

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

LUANA CRISTYNE DA CRUZ DEMOSTHENES

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM
CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO
DE BURITI**

**RIO DE JANEIRO
2019**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

LUANA CRISTYNE DA CRUZ DEMOSTHENES

COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM
CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO DE
BURITI

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador: Lucio Fabio Cassiano Nascimento, D.Sc.
Co-Orientador: Sérgio Neves Monteiro, PhD.

Rio De Janeiro
2019

©2019

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

	Demosthenes, Luana Cristyne da Cruz
	Comportamento balístico de blindagem multicamada com cerâmica frontal e compósito de epóxi reforçado com tecido de buriti / Luana Cristyne da Cruz Demosthenes. Rio de Janeiro, 2019.
	131 f.:
	Orientadores: Orientadores: Lucio Fabio Cassiano Nascimento, Sergio Neves Monteiro.
	Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.
	<ul style="list-style-type: none">• Compósitos. 2. Fibras naturais. 3. Blindagem Balística. I. Nascimento, Lucio Fabio Cassiano, orient. II. Monteiro, Sergio Neves. III. Título.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

LUANA CRISTYNE DA CRUZ DEMOSTHENES


**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM
CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM
TECIDO DE BURITI**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências, em Ciência dos Materiais.

Orientadores: Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento – D.C.

Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D

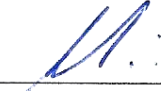
Aprovada em 16 de Maio de 2019 pela seguinte Banca Examinadora:




Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento - D.C. do IME – Presidente



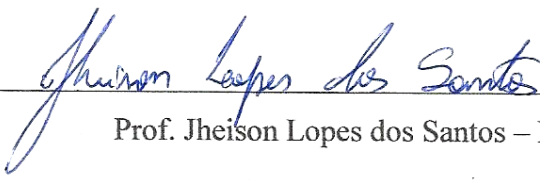
Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME



Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo – D.C. do IME



Prof. Fábio de Oliveira Braga – D.C. da UFF



Prof. Jheison Lopes dos Santos – D.C. da UCAM

Rio de Janeiro

2019

AGRADECIMENTOS

À Deus por renovar a fé em mim todos os dias e me fazer continuar mesmo quando havia apenas um feixe de luz no fim do túnel. E sei que se estou aqui hoje, é porque Ele me sustentou. A Ele toda honra e toda glória.

À minha mãe Lucia Cruz, ao meu irmão Leandro Demosthenes e a minha tia Elizabeth Cruz, por cada vídeo-chamada que renovava a minha energia para continuar nessa caminhada. Obrigada por toda confiança e vibração, vocês são insubstituíveis.

Aos meus Orientadores, Lucio Nascimento e Sergio Neves, agradeço por cada ensinamento disposto a mim e com toda certeza saio do mestrado com uma enorme bagagem que aprendi com os senhores tais bagagens que vão muito além do conhecimento teórico.

À Marcelly Quintão e a Natália Barony, existem algumas pessoas que possuem o dom de serem anjos e essa característica eu atribuo a essas minhas amigas que durante as etapas mais difíceis do mestrado elas sempre se fizeram presente. São amigas e companheiras, no qual eu sei que irão muito além dos nossos estudos e muito além da mureta.

À Michelle Oliveira, um parágrafo em especial a ela, pois em muitas vezes sanou minhas dúvidas com toda sua paciência e dedicação. Tu entende? Por isso, tenha a certeza que esse título é seu também.

Ao Fabio Garcia, Fernanda Luz e, novamente, Michelle Oliveira, felizes são aqueles que trabalham em um ambiente em que têm amigos. Agradeço a vocês por todos os ensinamentos diários, instruções para artigos, realizações de trabalhos e, além disso, por todas as companhias ao BK e os sorvetinhos semanais. “Boa time! Isso aí time!” Agradeço por serem os melhores e os piores dentro de um mesmo grupo.

À Nayara Trajano e Ana Camila, que são amigas que o ensino fundamental me deu e as trago até hoje comigo.

Aos amigos do IME sejam eles colegas de sala de aula ou do laboratório, Gabriel Bartholazzi, Suzana Noronha, Artur Campos, Ulisses Oliveira, Flávio James, Foluke Assis, Wendel Bruno, João Gabriel, Larissa Fernandes, Raphael Reis, o meu mais sincero agradecimento por cada ensinamento experimental ou da vida.

As minhas amigas de infância, Evelyn Paula, Norah Peñaranda, Yasmini Carvalho, Amanda Serrão, no qual até hoje acompanham e torcem pelo meu crescimento.

Ao Matheus Torquato, o meu não agradecimento.

Ao Guilherme Moreira e ao Paulo Maurício, por me apoiarem a sair de Manaus para evoluir em uma instituição tão renomada que é o IME.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME, por serem excelentes profissionais que trabalham em benefício da educação brasileira.

Ao CAEx (Centro de Avaliações do Exército), em especial ao Capitão D'amegon, Capitão Bittencourt, Sargento Hugo e à equipe da linha IV, por toda boa vontade e disponibilidade na realização dos ensaios balísticos.

Ao IMA e LNDC (Instituto de Macromoléculas), em especial ao Lucas Tienne e ao Brendon Bruno pelo apoio nos ensaios térmicos e ensaio de Impacto. Muito obrigado!

À CAPES, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos aqueles que mesmo sem saber ajudaram muito ao longo desse processo. De todo meu coração, amo cada um de vocês.

“A ambição da ciência não é abrir a
porta do saber infinito, mas estabelecer
um limite para o erro infinito”

Bertolt Brecht.

RESUMO

Os números crescentes da violência e dos conflitos armados tornam necessários sistemas de proteção eficientes e uma das soluções que tem apresentado resultados vantajosos é o sistema de blindagem multicamadas (SBMs). Os SBMs utilizam materiais mais leves e com baixo custo. Este tipo de blindagem normalmente é composto por três camadas. A primeira consiste em um material cerâmico, que tem a função de fragmentar a ponta do projétil e absorver a maior parte da energia do impacto balístico. A segunda pode ser composta por um compósito de matriz epóxi reforçado com fibras sintéticas ou naturais, com o objetivo de absorver a nuvem de fragmentos oriunda da fragmentação da camada cerâmica e, ainda, absorver mais uma parcela de energia. Uma terceira camada que consiste em um material dúctil, com a função de absorver a energia residual do impacto balístico através de deformação plástica. O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento balístico do compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de buriti nos teores de 10, 20 e 30% em volume como camada intermediária desse sistema. Os ensaios balísticos foram realizados, de acordo com os critérios e parâmetros da NIJ 0101.04, com munição de calibre 7,62x51 mm, a uma distância de 15 metros e com alta velocidade de impacto (>800m/s). Foi avaliada a eficiência balística destes SBMs, através da medição do trauma (indentação) na plastilina, bem como pela medição da velocidade residual e energia absorvida, após impacto da munição. Além disso, os compósitos foram submetidos a ensaios mecânicos, físicos e térmicos. Tais ensaios são impacto Charpy e Izod, espectroscopia vibracional no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TG) dinâmico-mecânico (DMA). Os resultados obtidos nos ensaios balísticos pela indentação na plastilina foram inferiores a 44mm, que é o previsto como letal ao ser humano pela norma internacional do National Institute of Justice (NIJ). Os dados dos ensaios balísticos foram tratados estatisticamente pelo método da Análise de Variância (ANOVA) e pelo Teste Tukey. Finalizados os testes pôde-se afirmar, com 95% de confiança, que não houve diferença de desempenho entre os SBMs montados com compósitos epoxídicos reforçados com tecidos de buriti em relação àqueles montados a partir dos materiais tradicionais utilizados para proteção individual contra munição 7,62 mm. Os valores foram satisfatórios, pois atenderam ao valor regido pela NIJ 0101.04, além de ter todos os fragmentos provenientes da interação do projétil com a cerâmica, independentemente da porcentagem do reforço. Por fim, foi realizada uma análise de peso e custo constatou-se que o reforço de 30% de tecido de buriti é o mais favorável economicamente para possíveis aplicações de engenharia, principalmente aquelas ligadas à proteção balística.

ABSTRACT

Due to the growing numbers of violent crimes and armed conflicts, efficient protection systems are increasingly required. One solution which has been presenting advantageous results is the multilayered armor system (MAS). The MAS employ lighter materials at lower costs and is usually formed by three layers. The first consists of a ceramic material, which is responsible for comminuting the projectile tip while absorbing most energy coming from the ballistic impact. The second layer is an epoxy-matrix composite reinforced with natural or synthetic fibers which has the goal of absorbing the fragments from the ceramic layer. In addition, the composite layer also absorbs a fraction of the impact energy. A third layer, which consists of a ductile material, absorbs the residual energy from the ballistic impact by plastic deformation. The goal of this research is to analyse the ballistic behaviour of epoxy-matrix composites reinforced with buriti fabric (10%, 20%, 30% and 40% in volume) as an intermediate layer in the MAS. The ballistic experiments were carried out according to the criterias and parameters of NIJ 0101.04, with 7,62x51 mm-caliber and 15 m-distance from the target and high impact speed (>800 m/s). The MAS ballistic efficiency was evaluated through trauma indentation measurements of the clay witness as well as analysing the residual velocity and absorbed energy after the bullet impact. Furthermore, the composites were submitted to mechanical, thermal and physical tests such as Charpy e Izod impact test, fourier-transformed infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TG) and dynamic mechanical analysis (DMA). The results found in the ballistic tests through clay witness indentation were inferior to 44mm that is predicted to be lethal to a human being by the international standards of the National Institute of Justice (NIJ). The ballistic test data were statistically compiled using the Variance Analysis (ANOVA) method and the Tukey Test. At the end of the tests, it was possible to affirm, with 95% confidence, that there was no difference in performance between the SBMs assembled with epoxy composites reinforced with buriti fabrics compared to those assembled from the traditional materials used for individual protection against ammunition 7,62 mm. The values were satisfactory, since they corresponded to the value governed by NIJ 0101.04, besides dereter all the fragments coming from the interaction of the projectile with the ceramics, independently of the reinforcement percentage. Finally, a weight and cost analysis was carried out to verify that the reinforcement of 30% of buriti tissue is the most economically favorable for possible engineering applications, especially those related to ballistic protection.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	11
LISTA DE TABELAS.....	16
LISTAS DE ABREVIATURAS	19
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	22
1.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA	24
2.2 SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM)	27
2.2.1 Camada Primária: Material Cerâmico	28
2.2.1.1 Conceitos gerais	28
2.2.1.2 Processamento cerâmico	30
2.2.2 Camada Secundária: Material Compósito	31
2.2.2.1 Características gerais.....	31
2.2.2.2 Regra das Misturas	32
2.2.2.3 Compósitos poliméricos	33
2.2.2.4 Fibras	34
2.2.2.4.1 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs)	34
2.2.2.4.2 Arranjo	38
2.2.2.4.3 Fibra de Buriti	39
2.2.2.4.4 Mecanismos de fratura do compósito reforçado com fibra.....	42
2.2.3 Camada Terciária	43
2.2.3.1 Material Metálico	43
2.2.3.2 Aramida	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 ASPECTOS GERAIS	45
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	45
3.2.1 Camada Primária: Cerâmica.....	45
3.2.1.1 Alumina e Nióbia	45
3.2.1.2 Fluoreto de Lítio.....	46
3.2.1.3 Polietilenoglicol	47
3.2.2 Camada Secundária: Compósito	48
3.2.2.1 Resina epóxi e endurecedor	48
3.2.2.2 Tecido de Buriti.....	49
3.2.3 Camada Terciária: Liga de alumínio e Aramida	49
3.2.3.1 Placa de Alumínio	50
3.2.3.2 Tecido de Aramida	50
3.3 MÉTODOS UTILIZADOS	51
3.3.1 Fabricação dos corpos cerâmicos	51
3.3.1.1 Caracterização dos corpos cerâmicos.....	54
3.3.2 Produção do compósito	55

3.3.3 Montagem do SBM	56
3.3.4 Ensaio Balístico.....	57
3.3.4.1 Ensaio balístico velocidade residual	58
3.3.4.2 Ensaio balístico Plastilina.....	59
3.3.5 Ensaio de impacto	60
3.3.6 Caracterização das Fibras, tecidos e dos compósitos	61
3.3.6.1 Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido.....	61
3.3.6.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	62
3.3.6.3 Difração de raios X (DRX)	63
3.3.6.4 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	63
3.3.6.5 Análise termogravimétrica (TG)	64
3.3.6.6 Análise dinâmico-mecânica (DMA)	65
3.3.7 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	66
3.3.8 Método estatístico (ANOVA)	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 CAMADA PRIMÁRIA: CERÂMICA	69
4.1.1 Densificação dos corpos cerâmicos.....	69
4.2 CAMADA SECUNDÁRIA: COMPÓSITO.....	74
4.2.1 Caracterização dos tecidos e compósitos	74
4.2.1.1 Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido.....	74
4.2.1.2 Densidade do compósito	76
4.2.1.3 FTIR	78
4.2.1.4 DRX	79
4.2.1.5 TG.....	80
4.2.1.6 DSC	84
4.2.1.7 DMA.....	85
4.2.2 Ensaio de Impacto	90
4.2.2.1 Ensaio de Impacto Charpy	90
4.2.2.2 Ensaio de Impacto Izod	94
4.2.2.3 Comparativo entre os ensaios de impacto	98
4.2.3 Ensaio Balístico.....	101
4.2.3.1 Ensaio Balístico de velocidade residual	101
4.2.3.2 Ensaio balístico plastilina.....	104
4.2.3.2.1 Ensaio na plastilina para a primeira camada com e sem LiF	104
4.2.3.2.2 Ensaio na plastilina para a camada secundária diferenciada.....	107
4.2.3.2.3 Ensaio na plastilina para a terceira camada diferenciada	109
4.2.3.2.4 Comparativo entre os dois SBMs.....	112
4.3 ANÁLISE DE CUSTO E PESO	113
5 CONCLUSÕES	116
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

Lista de ilustrações

Figura 2.1 Trauma do projétil medido por indentação no material de referência (plastilina)..	26
Figura 2.2 - Esquema de um Sistema de Blindagem Multicamada.	28
Figura 2.3 - Fluxograma do processamento cerâmico.	30
Figura 2.4 - Corpos cerâmicos produzidos para o ensaio balístico.....	31
Figura 2.5 - Esquema de classificação para os tipos de compósitos	32
Figura 2.6 - Divisões das FNL de acordo com sua localização de extração.....	35
Figura 2.7 - Representação da região cristalina e amorfa dentro da fibra.....	36
Figura 2.8 - Representação esquemática de uma fibrila.....	37
Figura 2.9 - Exemplo da trama de tecido do tipo simples.....	39
Figura 2.10 - Representação no mapa do Brasil dos locais que possuem palmeiras de Buriti.	40
Figura 2.11 - Representação da Palmeira de Buriti (a) copa da arvore em comparação com as demais (b) folhas mortas ainda presas na arvore e (c) fruto.....	40
Figura 2.12 - Representação das (a) áreas que podem ser extraídas as fibras, o pecíolo, fruto e o linho da palmeira e (b) tecido de buriti utilizado nessa pesquisa.....	41
Figura 2.13 - Mecanismos de falhas que podem estar associados a compósitos reforçados por fibras.....	42
Figura 2.14 - Esquema ilustrando as etapas do mecanismo de delaminação dos compósitos reforçados com fibras (a) antes da ruptura e (b) depois da ruptura.....	43
Figura 3.1 - Resina epóxi e endurecedor - Epoxyfiber.	48
Figura 3.2 - Aspecto geral do tecido de buriti.....	49

Figura 3.3 - Chapa de liga de alumínio 5052 H34.	50
Figura 3.4 - Aspecto geral do tecido de Kevlar®.....	51
Figura 3.5 - (a) Moinho de bolas da marca MARCONI utilizado no processamento e (b) estufa utilizada para secar os pós cerâmicos.	52
Figura 3.6 - Equipamentos utilizados no processamento cerâmico (a) almofariz e pistilo e (b) agitador.....	53
Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para produzir os corpos cerâmicos (a) matriz metálica, (b) prensa e (c) forno.....	53
Figura 3.8 - Taxas e patamares utilizados no forno para sinterizar as peças cerâmicas.	54
Figura 3.9 - Ensaio para caracterização das pastilhas cerâmicas (a) cerâmicas produzidas e (b) matriz metálica utilizada.	55
Figura 3.10 - Equipamentos utilizados para produzir os compósitos (a) matriz metálica e (b) graxa de silicone usada para desmoldar os compósitos.	56
Figura 3.11 - Produção dos compósitos (a) resina e endurecedor, (b) prensa SKAY e (c) compósitos.....	56
Figura 3.12 - Cola à base de poliuretano para aderir os diferentes materiais que compõe o SBM e SBM (b) com chapa de alumínio e (c) com tecidos de aramida.	57
Figura 3.13 - (a) Munição 7,62mm M1, (b) Proвете com mira laser e (c) Esquema do sistema utilizado com barreira óptica modelo B471 da HPI.....	58
Figura 3.14 (a) Aparato para medição da velocidade residual e (b) Radar doppler, modelo SL-520P do CAEx (LUZ, 2014) (adaptado).	58
Figura 3.15 - (a) Plastilina (LUZ, 2014) (adaptado) e (b) sensor a laser.	59
Figura 3.16 - Corpo de prova utilizado nos ensaios com as respectivas dimensões.	60
Figura 3.17 - Espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em um modelo IR PRESTIGE 21-FTIR-SHIMADZU.....	62

Figura 3.18 - Equipamento de DSC da TA instruments, modelo Q1000.....	64
Figura 3.19 - Equipamento TA instruments modelo Q500.....	64
Figura 3.20 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de DMA.....	65
Figura 3.21 - Microscópio eletrônico de varredura, modelo Quanta FEG 250, da FEI.....	66
Figura 3.22 - (a) Sistema de deposição de alto vácuo, LEICA, modelo EM ACE600; (b) Detalhe de amostras após recobrimento de ouro.....	66
Figura 4.1- Micrografia das composições cerâmicas estudadas com um aumento de (a) 5.000X e (b) 10.000X.....	71
Figura 4.2 - Micrografia da amostra cerâmica sem LiF após o ensaio balístico, com um aumento de 10000x.....	73
Figura 4.3 - Análise da presença do LiF nas pastilhas cerâmicas por meio do EDS.....	73
Figura 4.4 - Micrografia com as rugosidades e imperfeições da fibra de Buriti (a) superficial, com um aumento de 800x; (b) interna da fibra, com um aumento de 800x e (c) trama simples do tecido de buriti com aumento 50x.....	75
Figura 4.5 - Micrografia da fibra de buriti indicando o ponto analisado pela EDS.....	76
Figura 4.6 - Micrografia da interface da fibra com a matriz de resina epóxi no aumento de 500x.....	77
Figura 4.7 - Espectro obtido na fibra de buriti inserir o cm^{-1}	79
Figura 4.8 - Difratoograma obtido para a fibra de buriti.....	79
Figura 4.9 - Difratoograma obtido para os compósitos reforçados com tecido de buriti.....	80
Figura 4.10 - Curvas de TG/DTG para a fibra de Buriti.....	81
Figura 4.11- Curva de TG dos compósitos reforçados com tecido de buriti.....	82
Figura 4.12 - DTG dos compósitos reforçados com tecido de buriti.....	83

Figura 4.13 - Curva obtida no ensaio de DSC para o tecido de buriti.	84
Figura 4.14 - Curva obtida no ensaio de DSC para os compósitos reforçados com tecido de buriti.	85
Figura 4.15 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ para compósito epoxídico reforçado com 10% de tecido de Buriti.	86
Figura 4.16 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ para compósito epoxídico reforçado com 20% de tecido de Buriti.	87
Figura 4.17 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ para compósito epoxídico reforçado com 30% de tecido de Buriti.	88
Figura 4.18 - Característica macro das fraturas das amostras ensaiadas no Impacto Charpy para os compósitos epoxídicos reforçados com tecido de buriti em 10, 20 e 30%.	90
Figura 4.19 - Energia de impacto Charpy versus percentuais dos compósitos analisados.	92
Figura 4.20 - Energia de impacto Izod versus percentuais dos compósitos analisados.	95
Figura 4.21 - Energias absorvidas pelos ensaios de impacto, Charpy e Izod, para os compósitos reforçados com tecido de buriti.	98
Figura 4.22 - Micrografia obtidas por MEV das amostras de (a) CETB10, (b) CETB20 e (c) CETB30 e a legenda explicativa das setas.	100
Figura 4.23 - Aspecto geral dos compósitos reforçados com tecido de buriti após o ensaio de velocidade residual.	101
Figura 4.24 - Comparação da indentação na plastilina para os SBM produzidos com camada frontal diferenciadas.	106
Figura 4.25 - SBMT após ensaio balístico (a) frente da amostra do CETB10, (b) verso da amostra do CETB10, (c) frente da amostra do CETB20, (d) verso da amostra CETB20, (e) frente da amostra do CETB30 e (f) verso da amostra do CETB30.	108

Figura 4.26 - Micrografia da fibra de Buriti (a) antes do ensaio balístico, com um aumento de 2500x e (b) após o ensaio balístico, com um aumento de 1300x e (c) fibra de Kevlar™ após ensaio balístico.....	109
Figura 4.27 - SBMA após ensaio balístico (a) frente da amostra do CETB10, (b) verso da amostra do CETB10, (c) frente da amostra do CETB20, (d) verso da amostra CETB20, (e) frente da amostra do CETB30 e (f) verso da amostra do CETB30.	111
Figura 4.28 - Comparação dos SBM com a terceira camada sendo SBMT e SBMA uma placa de alumínio de acordo com sua indenteção.....	112

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação do nível de proteção de blindagem balística.....	25
Tabela 2.2 - Características básicas e propriedades que diferem uma fibra da outra.	37
Tabela 2.3 - Propriedades típicas das fibras de Buriti.....	41
Tabela 3.1 - Composição química da Alumina	46
Tabela 3.2 - Composição química da Nióbia.	46
Tabela 3.3 - Composição química do Fluoreto de Lítio.....	47
Tabela 3.4 - Propriedades do polietilenoglicol.....	47
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas nominais da liga de alumínio utilizada.....	50
Tabela 3.6 - Propriedades da fibra de Aramida.....	51
Tabela 3.7 - Caracterização e análises aplicadas na fibra e nos compósitos de buriti.	61
Tabela 3.8 - Parâmetros estatísticos utilizados de acordo com à análise de variância (ANOVA).	67
Tabela 4.1 - Densidade e densificação das amostras cerâmicas.	69
Tabela 4.2 - Análise estatística da densificação das pastilhas cerâmicas com e sem LiF.....	70
Tabela 4.3 - Resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios da densificação das pastilhas cerâmicas com e sem o fluoreto de Lítio, após aplicação do teste de Tukey.....	70
Tabela 4.4 - Tamanho das partículas cerâmicas com e sem LiF.....	71
Tabela 4.5 - Análise estatística das medidas dos TP das pastilhas cerâmicas com e sem LiF. 72	
Tabela 4.6 - Densidade superficial do tecido de Buriti.	74
Tabela 4.7 - Composição dos elementos na fibra de Buriti obtidos pela EDS.	76

Tabela 4.8 - Densidade dos compósitos por meio da regra das misturas e pela densidade geométrica.....	77
Tabela 4.9 - Perdas de massa e temperatura máxima de degradação dos compósitos reforçados com tecido de buriti.....	82
Tabela 4.10 - Dados obtidos no ensaio de DMA dos compósitos reforçados com tecido de buriti.....	88
Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos por DMA para compósitos poliméricos reforçados com 30% em volume de FNL em configurações de tecido e fibra.....	89
Tabela 4.12 - Resultados das energias absorvidas (J/m) no ensaio de impacto Charpy para os compósitos reforçados com tecido de buriti.....	91
Tabela 4.13 - Análise de variância da energia de impacto Charpy para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.....	92
Tabela 4.14 - Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Charpy pelo teste de Tukey.....	93
Tabela 4.15 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy para os compósitos de 30% de reforço e comparação com os outros autores.....	93
Tabela 4.16 - Resultados das energias absorvidas (J/m) no ensaio de impacto Izod para os compósitos reforçados com tecido de buriti.....	95
Tabela 4.17 - Análise de variância da energia de impacto Izod para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.....	96
Tabela 4.18 - Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Izod pelo teste de Tukey.....	96
Tabela 4.19 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy para os compósitos de 30% de reforço e comparação com os outros autores.....	97
Tabela 4.20 - Energia absorvida após o ensaio de velocidade residual para os compósitos com tecido de buriti.....	102

Tabela 4.21 - Análise da variância para os resultados de E_{abs} pelo método da velocidade residual.	102
Tabela 4.22 - Velocidade limite após o ensaio de velocidade residual para os compósitos com tecido de buriti.....	103
Tabela 4.23 - Indentação na plastilina para os compósitos com camada frontal diferenciadas.	104
Tabela 4.24 - ANOVA para as leituras da indentação na plastilina para os SBM com a camada frontal diferenciada.	105
Tabela 4.25 - Indentação na plastilina para os SBMT reforçados com tecido de buriti.	107
Tabela 4.26 - Análise de variância do SBMT para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.....	107
Tabela 4.27 - Indentação na plastilina para os SBMA reforçados com tecido de buriti.....	110
Tabela 4.28 - Análise de variância do SBMT para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.....	110
Tabela 4.29 - Comparação entre as médias de indentação na plastilina para os SBMA pelo teste de Tukey.	110
Tabela 4.30 - Custos e peso dos componentes do SBMTs.....	114
Tabela 4.31 - Comparativo entre peso e custos totais de um SBMT usando Kevlar™ e usando compósitos reforçados com tecido de buriti.....	115

Listas de abreviaturas

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRABLIN	- Associação Brasileira de Blindagens
ANOVA	- Análise de Variância
ASTM	- American Society for Testing of Materials
CAEx	- Centro de Avaliações do Exército
DSC	- Calorimetria Diferencial de Varredura
DTG	- Termogravimetria Derivativa
EDS	- Espectroscopia por Dispersão de Energia dos elétrons
FNL	- Fibra Natural Lignocelulósica
FTIR	- Infravermelho por Transformada de Fourier
IC	- Iniciação Científica
IMA	- Instituto de Macromoléculas
IME	- Instituto Militar de Engenharia
LNDC	- Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	- Norma Brasileira
NIJ	- National Institute of Justice
PEG	- Polietileno Glicol
SBM	- Sistema de Blindagem Multicamadas
TG	- Análise Termogravimétrica
TP	- Tamanho de Partícula
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro

1 INTRODUÇÃO

A violência e os conflitos armados têm aumentado drasticamente nos últimos anos e, tanto para civis quanto para militares. Isso requer uma proteção adequada que seja capaz de reter munições desde calibres com baixa velocidade de impacto até os de alta velocidade (MONTEIRO et al, 2011; LUZ, 2014; BRAGA, 2015). Dados estatísticos apontam que, apenas em 3 meses no ano de 2018, só no Estado do Rio de Janeiro, 30 policiais foram mortos, nas mais diversas situações de conflito (G1, 2018).

O aumento da violência impulsiona os pesquisadores a criarem materiais que resistam aos mais diversos artefatos e ameaças (MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO et al, 2011). Dentre tais materiais, destaca-se o Sistema de Blindagem Multicamadas (SBMs), que são materiais compostos por três camadas distintas que apresentam características específicas para resistir ao impacto de munição de fuzil (7,62 mm). A primeira camada é um material duro e frágil que tem o intuito de absorver energia e fragmentar o projétil (MEDVEDOVSKI, 2010; LUZ, 2015; BRAGA et al, 2017). Como segunda camada é utilizado um material com densidade menor que o cerâmico e que têm o intuito de absorver uma parcela significativa da energia cinética produzida pelos estilhaços, tanto do cerâmico quanto do projétil (MEDVEDOVSKI, 2010). A terceira camada é composta, geralmente, por uma chapa de alumínio que possui característica dúctil, com capacidade de deformar plasticamente e reter possíveis fragmentos, remanescentes do projétil e camadas anteriores (MONTEIRO et al, 2011).

Um possível material para ser empregado como camada intermediária do SBMs é formado por compósitos poliméricos reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs). De maneira geral os compósitos são materiais multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER e RETHWISCH, 2018). Essas fases possuem composição e estrutura diferentes, o que as tornam praticamente insolúveis entre elas (CHAWLA, 1987). Normalmente os compósitos são formados por uma fase contínua, também chamada de matriz e uma fase dispersa (CALLISTER e RETHWISCH, 2018). Tal definição pode ser considerada ampla e inclui ligas metálicas, co-polímeros de plástico, minerais e madeiras (MAZUNDAR, 2002). Um compósito polimérico reforçado com fibras

consiste em uma fase matriz constituída de uma resina e a outra fase de fibra, que pode ser sintética ou natural.

O interesse atual em fabricar compósitos reforçados com fibras naturais se deve, entre outros fatores, a preocupação com a conservação ambiental e utilização de materiais renováveis (SATYANARAYANA et al, 2007; NASCIMENTO, 2017). Além disso, a produção desses materiais naturais, em substituição aos artificiais, pode representar uma diminuição no consumo de energia durante o seu processo de fabricação e, conseqüentemente, redução nos custos de produção. Ademais, a possibilidade de favorecimento de regiões economicamente menos desenvolvidas, como a região norte e nordeste do Brasil (MONTEIRO et al, 2011). Outra importante motivação consiste na geração de empregos no setor rural, visto que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de fibras naturais (SATYANARAYANA et al, 2007), fato que naturalmente refletirá positivamente no Produto Interno Bruto (PIB).

As fibras lignocelulósicas são constituídas basicamente de celulose, hemicelulose e lignina (SATYANARAYANA et al, 2007). A celulose apresenta uma forma fibrosa que, juntamente com suas características estruturais, confere a fibra requisitos necessários para diversas aplicações na grande área de engenharia. Porém, a presença de propriedades não uniformes pode se uma desvantagem na utilização esse tipo de material (LEÃO et al., 1998). Um exemplo de fibra natural que pode ser utilizada para essa finalidade é a fibra de Buriti (*Mauritia Flexuosa*). A fibra é oriunda de uma palmeira tipicamente de terras alagáveis do Cerrado e da floresta Amazônica, as fibras podem ser extraídas das folhas (linho) ou do pecíolo.

Portanto a presente pesquisa propõe-se utilizar tecido confeccionado com a fibra de Buriti em um compósito de matriz epóxi como camada intermediária, dentro de um SBM. Também se propõe a realizar ensaios para caracterizar as fibras utilizadas quanto as suas propriedades térmicas e mecânicas. Isto contribuirá para o enriquecimento de informações relativas à fibra natural de buriti e dos seus compósitos, bem como vislumbrar aplicações futuras, não apenas restritiva a área de blindagem balística.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os fatos e acontecimentos nos últimos anos, decorrentes do aumento da violência e até mesmo de alguns atentados terroristas, tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais para o emprego em blindagens balísticas. Em vista disso, a área de blindagem balística é de grande interesse do Exército Brasileiro, em especial do Instituto Militar de Engenharia, no qual a seção de engenharia mecânica e de materiais vem atuando há alguns anos na aplicação de materiais com melhor relação custo-benefício, como as Fibras Naturais Lignocelulósicas. Tais materiais são aplicados em compósitos poliméricos e analisados como camada intermediária e podem substituir os materiais que são utilizados comercialmente, como as fibras de aramida. Além disso, esses materiais possuem um menor custo e favorecem a economia de regiões brasileiras menos desenvolvidas.

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de um SBM que consiste no compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de Buriti como camada secundária. O tecido de Buriti será incorporado na matriz nas frações de 10, 20 e 30% em volume e será comparado com outros compósitos de fibras naturais e com o sistema utilizado comercialmente, ou seja, compósitos com o tecido de aramida.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar a eficiência balística dos materiais testados como camada intermediária na blindagem multicamadas conforme a norma internacional NIJ 0101.04 (2000);

- b) Verificar a fração de Tecido de Buriti (10, 20 ou 30% vol.) que resulta no melhor desempenho balístico;
- c) Avaliar como inserto o SBM constituído apenas com a camada primária de cerâmica e o compósito epóxi-tecido de buriti para tornar a blindagem nível III;
- d) Verificar se há diferença no desempenho balístico do SBM produzido com a camada frontal feita com alumina dopada apenas com nióbia e de alumina com nióbia e fluoreto de lítio;
- e) Comparar o desempenho balístico individual, por meio da velocidade limite (V_L) e energia absorvida (E_{abs}), dos compósitos de tecido de buriti utilizados como camada intermediária com outros trabalhos que utilizaram FNL reforçando compósitos poliméricos.
- f) Calcular a energia de impacto Charpy e Izod absorvida pelos compósitos e relacioná-la com a fração volumétrica do tecido de buriti;
- g) Avaliar as propriedades químicas (grupos funcionais) da FNL de buriti por meio da análise de espectroscopia vibracional no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- h) Analisar as superfícies de mecanismos de fratura dos compósitos após os ensaios balísticos, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de verificar os mecanismos de absorção de energia envolvidos;
- i) Analisar através de DSC, TGA e DTG dos compósitos de epóxi reforçado com tecido de buriti e da FNL de buriti;
- j) Calcular através de curvas de DMA a temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos de epóxi reforçados com 0%, 10%, 20% e 30% v/v de tecido de buriti, bem como os módulos de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e tangente delta ($Tan\delta$);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

A blindagem corporal destina-se a proteger os indivíduos, em especial, contra fragmentos e projéteis de armas (MEYERS, 1994). O crescente avanço das tecnologias ligadas à produção de armamentos impulsiona a necessidade de estudos para obtenção de tecnologia de fabricação de blindagens modernas que possam assegurar a proteção adequada aos usuários (SANTOS et al, 2006).

Durante a Segunda Guerra Mundial as proteções balísticas eram compostas por uma camada de material metálico, em geral aço 36SGN, com 2mm de espessura e pesando mais de 3,5 kg por placa (BORVIK et al, 1999). Uma das formas de solucionar essa situação foi a introdução de novas combinações de materiais leves e com melhor desempenho balístico, tais como compósitos de fibras e materiais cerâmicos (BÜRGER et al, 2012). Além disso, ao produzir materiais para blindagem busca-se atentar para alguns requisitos como:

- Leveza - para que o combatente tenha uma melhor mobilidade com a proteção;
- Resistência à penetração - de modo que o projétil não seja capaz de perfurar a proteção;
- Alta absorção de energia - a fim de evitar que o usuário sofra as consequências de um trauma e;
- Custo - este é um fator limitante quando se trata de um sistema de produção, visto que é fundamental controlar os custos de produção.

Estas propriedades devem se equilibrar a fim de se obter a proteção mais eficiente possível. Entretanto ao melhorar um desses fatores pode-se influenciar negativamente outro, ou seja, é possível melhorar a resistência a penetração aumentando a espessura, entretanto a mobilidade pode ser prejudicada. Analisando-se o custo, torna-se inviável trabalhar com um material que possui um alto valor aquisitivo, enquanto o Brasil possui uma grande variedade de fibras naturais, as quais podem ter aplicações de engenharia.

Por tais motivos é que dificilmente um único material seria capaz de cumprir todos os pré-requisitos para fabricação de blindagens eficientes. Durante a última década, diversos

estudos foram feitos focando no desenvolvimento de sistemas de blindagens leves que utilizam materiais como cerâmicas avançadas e compósitos reforçados com fibras, e seu desempenho balístico para uso individual, em veículos e aplicações estruturais (ABRATE, 1998; MEDVEDOVSKI, 2006; TASDEMIRCI et al, 2012).

As proteções balísticas são determinadas de acordo com um padrão internacional (NIJ), no qual o nível de proteção é determinado com o calibre da munição, massa do projétil e velocidade do projétil (Tabela 2.1). Ademais, tal instituto especifica normas e padrões de ensaio, bem como as distâncias e locais que serão efetuados os disparos do projétil.

Tabela 2.1 - Classificação do nível de proteção de blindagem balística.

Nível de proteção	Calibre	Massa do projétil (g)	Velocidade Mínima do Projétil (m/s)
I	.22 LR	2,6	310
	.38 SPL	10,2	239
II-A	9 mm	8	320
	357Mag	10,2	369
II	9 mm	8	343
	357Mag	10,2	410
III-A	9 mm	8	411
	.44 Mag	15,6	411
III	7.62 x 51 mm	9,7	823
IV	30 - 06	10,8	853

Fonte: Adaptado da NIJ 0101.04 (2000).

Há outras normas e padrões para avaliações de sistemas de blindagem balística. Um exemplo é a norma Brasileira ABNT NBR 15000 que preconiza as formas para realizar os ensaios balísticos no Brasil. Por outro lado, a NIJ 0101.04 (2000) é a mais difundida no âmbito do Exército Brasileiro, portanto a presente dissertação foi desenvolvida para avaliar a eficiência de um SBM com classificação nível III, tomando por base a norma internacional supracitada.

Ainda de acordo com a NIJ 0101.04 (2000), é possível verificar a eficácia do sistema de blindagem balística através de alguns métodos, entretanto, o mais imediato e simples consiste na verificação do trauma (indentação) causado na plastilina após a execução de ensaios

balísticos com munição 7,62 mm. Tal indentação não pode ser superior a 44 mm, caso contrário o dano pode ser considerado como letal para o corpo humano em uma ocorrência real.

A plastilina consiste de um material de referência que simula a consistência do corpo humano. Caracteriza-se por um bloco homogêneo de massa de modelar à base de óleo, não-endurecível, colocado em contato com a face posterior da placa de blindagem no momento do ensaio balístico, como é mostrado na Figura 2.1 (NIJ 0101.04, 2000; BRAGA, 2015).

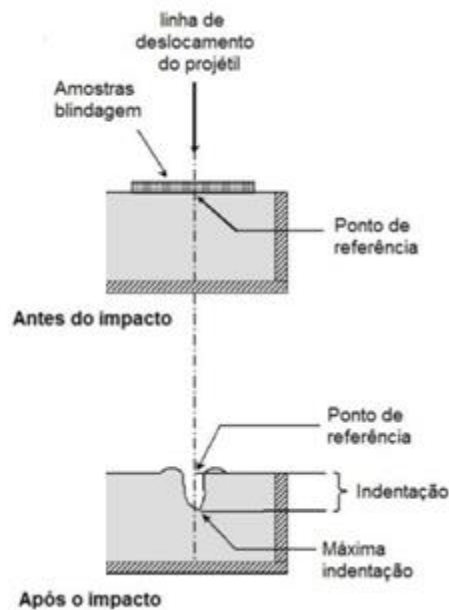


Figura 2.1 Trauma do projétil medido por indentação no material de referência (plastilina).

Fonte: Adaptado NIJ 0101.04 (2000) e BRAGA, 2015.

Outras metodologias de avaliação da eficiência de um sistema de blindagem se baseiam na energia cinética do projétil no momento do impacto. Estudos realizados por Wang et al (2014), mostraram que a velocidade do projétil é de vital importância para a determinação da energia cinética e, portanto deve ser considerada como variável primária e independente obtida nos ensaios de sistemas balísticos.

A chamada velocidade limite (V_L) é considerada com um dos fatores fundamentais na avaliação de sistemas de blindagem, e pode ser definida como a máxima velocidade para a qual o projétil é retido pelo sistema de blindagem. Uma das maneiras mais usuais para a determinação do V_L é através do chamado V_{50} , que é a velocidade em que a probabilidade da blindagem ser perfurada pelo projétil é de 50%. Mas em situações de disparos alta energia, ou seja, em que a velocidade do projétil será sempre alta o suficiente para promover a perfuração

da blindagem (>800m/s), a determinação de V_L através de V_{50} pode se tornar inviável. Deste modo, Morye et al (2000) utilizaram um modelo analítico que seria capaz de estimar a velocidade limite com base na energia cinética absorvida pela blindagem (E_A), apresentada na EQ. 2.1.

$$E_A = \frac{m}{2} (V_0^2 - V_R^2) \quad \text{EQ. 2.1}$$

Onde V_0 e V_R são as velocidades inicial e residual do projétil, respectivamente. E m a massa do projétil. Na situação em que V_R for igual a zero, tem-se que o sistema de blindagem foi capaz de absorver totalmente a energia cinética do projétil, ou seja, o projétil seria barrado pelo sistema. Tomando essa condição de contorno em consideração, a velocidade limite pode ser estimada pela EQ. 2.2.

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_A}{m}} \quad \text{EQ. 2.2}$$

2.2 SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM)

Os Sistemas de Blindagem Multicamada (SBM) são compostos geralmente por três camadas distintas, que apresentam características específicas para resistir ao impacto de munição de fuzil 7,62 mm (Figura 2.2). A primeira camada é formada por um material duro e frágil que tem o objetivo de absorver energia e fragmentar o projétil (LUZ, 2014; BRAGA et al 2017; MEDVEDOVSKI, 2010; NASCIMENTO, 2017). Como segunda camada utiliza-se um material com densidade menor que o cerâmico e que têm a função de absorver uma parcela significativa da energia cinética produzida pelos estilhaços, tanto do cerâmico quanto do projétil (LUZ, 2014; BRAGA, 2015; NASCIMENTO, 2017). A terceira camada é composta por uma chapa de alumínio que possui característica dúctil, com capacidade de deformar plasticamente e reter possíveis fragmentos, remanescentes do projétil e camadas anteriores.

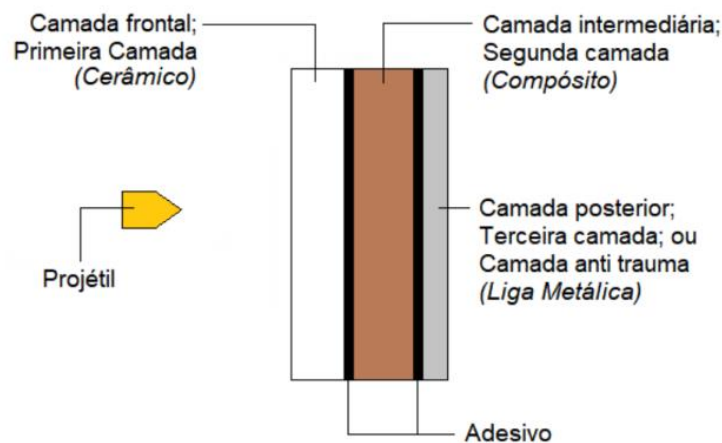


Figura 2.2 - Esquema de um Sistema de Blindagem Multicamada.

Os capítulos seguintes apresentam, de forma isolada, cada camada do SBM e suas respectivas características. Serão apresentados também os motivos para unir todos os materiais e empregá-los em um conjunto para submetê-los a testes balísticos.

2.2.1 Camada Primária: Material Cerâmico

2.2.1.1 Conceitos gerais

Os materiais cerâmicos são definidos como materiais inorgânicos, com ligações predominantemente iônicas ou covalentes entre elementos metálicos e não metálicos (RIEDEL, 2008; CALLISTER e RETHWISCH, 2018; CHAGAS, 2014). Os materiais cerâmicos podem ser divididos em duas classes, sendo elas tradicionais e avançadas. As cerâmicas tradicionais não exibem propriedades excepcionais, e as mais utilizadas industrialmente incluem três componentes básicos: a argila, o quartzo, e o feldspato (SANTOS, 2016). As cerâmicas avançadas são preparadas de forma a possuírem propriedades excepcionais, sejam elas mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou óticas adequadas para aplicações de engenharia (SANTOS, 2016).

As cerâmicas utilizadas na blindagem multicamada são as classificadas como avançadas e precisam ter propriedades como alta dureza, resistência mecânica, rigidez e resistência a compressão. Tais características são necessárias, pois essa camada é responsável

pela absorção de um percentual significativo, em torno de 55%, da energia cinética inicial do projétil (LOURO, 1989; ANDERSON, 1992; SHOKRIEH, 2008; MEDVEDOVSKI, 2010; LUZ, 2014).

Os materiais cerâmicos usados em SBM podem ser formados por composições de carbetos de silício (SiC), carbetos de boro (B₄C), óxido de ítrio (Y₂O₃), nitreto de silício (Si₃N₄) e os mais utilizados atualmente, em função da sua ótima relação custo-benefício, são o óxido de alumínio ou alumina (Al₂O₃), normalmente aditivada com nióbia (Nb₂O₅) e Fluoreto de Lítio (LiF). Diversos estudos foram conduzidos no desenvolvimento de blindagens balísticas utilizando estes materiais, com aditivos ou não e sob diferentes formas (GOMES, 2004; TRINDADE, 2012; CHAGAS, 2014), buscando ampliar cada vez mais a eficiência das blindagens balísticas.

A alumina possui características favoráveis para serem utilizadas em ambientes abrasivos, corrosivos e com elevadas temperaturas. Além disso, também é utilizada em sistemas de blindagem contra projéteis de alta velocidade de impacto, pois é capaz de fragmentar a ponta do projétil, auxiliando na dissipação de energia (GOMES, 2004; TRINDADE, 2012; CHAGAS, 2014).

O Óxido de Nióbio, comumente chamado de nióbia, é utilizado como aditivo de sinterização na alumina, já que permite reduzir tanto a temperatura quanto o tempo de sinterização da mesma. Além disso, promove o crescimento do grão da microestrutura final sinterizada, o aumento na taxa de retração, bem como elevada densidade e boas propriedades mecânicas (GOMES, 2004; ASSIS, 2016). A presença de nióbia gera precipitados como uma segunda fase nos contornos de grãos da alumina, aumentando a área superficial a ser percorrida pelas trincas produzidas pelo impacto balístico, e por conseguinte, a absorção de energia durante o impacto, devido ao fato da modificação do modo de fratura transgranular para intergranular na fragmentação (LOURO et al, 2001).

O Fluoreto de Lítio, por sua vez, possui características como a temperatura de fusão, relativamente baixa, da ordem de 850°C, sendo possível utilizá-lo como aditivo de sinterização por formar uma fase líquida entre os contornos de grão (DOUGLAS, 1954). Estudos anteriores afirmam que o LiF possui uma boa interação com a Nióbia e essa mistura permite diminuir a temperatura de sinterização de 1600°C para até 1300°C (SANTOS, 2016).

2.2.1.2 Processamento cerâmico

O processamento cerâmico compreende uma série de etapas necessárias para a obtenção de um determinado produto com propriedades específicas e características desejadas. A sequência para a obtenção da pastilha cerâmica esta ilustrada na Figura 2.3, na qual o fluxograma apresenta de forma resumida cada etapa do processamento.

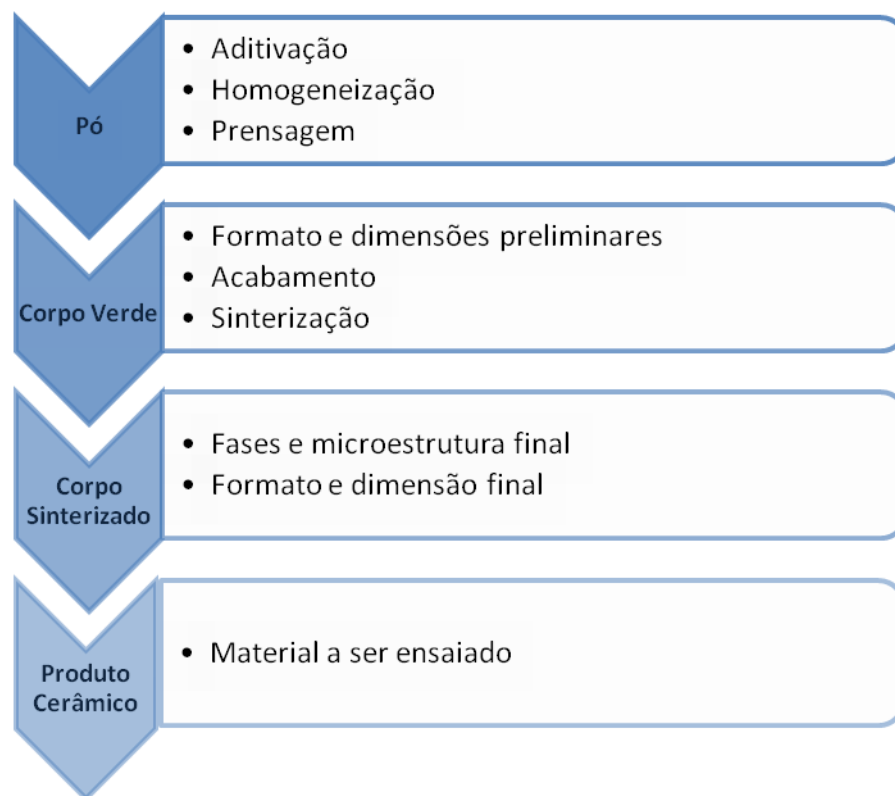


Figura 2.3 - Fluxograma do processamento cerâmico.

A alumina em pó é misturada e com pós de Nb_2O_5 e LiF , além de um ligante molecular. O ligante molecular é o Polietileno Glicol 400 (PEG 400), que permite reduzir o tamanho médio das partículas e contribui para um formato mais esférico das mesmas. Os ligantes PEG são solúveis em água e muito puros, e em uma ampla faixa de solventes, possuem uma solubilidade limitada (REED, 1995). Após a adição de todos os constituintes, a mistura é colocada em um moinho para garantir que haja uma homogeneização entre todos os elementos. Em seguida os pós são prensados com o auxílio de uma prensa mecânica e uma matriz metálica. Nessa etapa o PEG tem mais função, fornecer resistência mecânica mínima

ao corpo verde, possibilitando manusear os corpos cerâmicos até a colocação no forno, para iniciar o processo de sinterização.

O corpo verde refere-se ao material que é obtido logo após a prensagem, onde o corpo ainda não foi colocado no forno para sinterização. O corpo possui dimensões preliminares muito próximas das dimensões finais, porém com propriedades mecânicas abaixo dos valores desejados (NASCIMENTO, 2017).

O corpo torna-se sinterizado quando o material é submetido a um aquecimento, com taxas e temperaturas especificadas. Nesse momento o pó cerâmico que estava apenas compactado é transformado em um corpo cerâmico denso e resistente (SANTOS, 2016). Por fim, após essas etapas é obtido o produto cerâmico no qual está ilustrado na Figura 2.4.

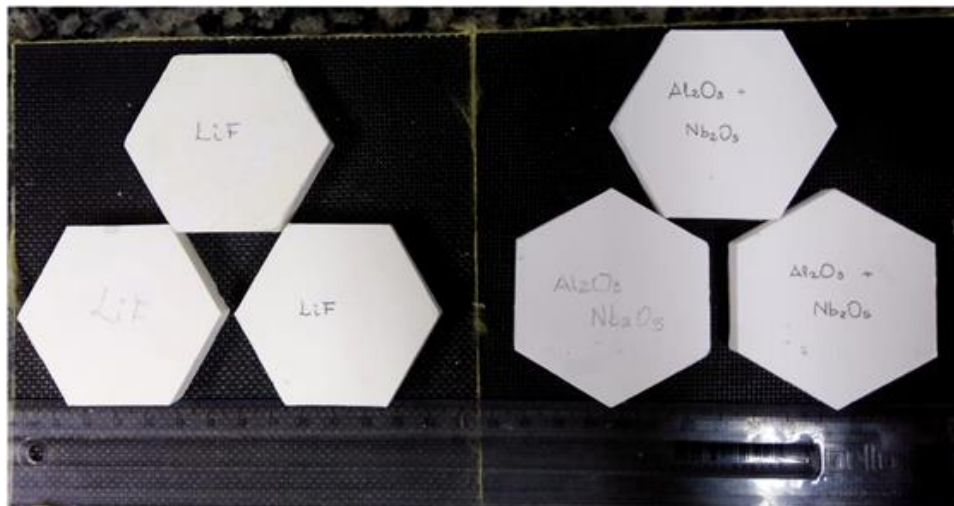


Figura 2.4 - Corpos cerâmicos produzidos para o ensaio balístico.

2.2.2 Camada Secundária: Material Compósito

2.2.2.1 Características gerais

Os materiais compósitos são materiais compostos por dois ou mais materiais, com o intuito de se obter características que não seriam possíveis utilizando apenas um material. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, de modo a obter-se sinergia de propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada,

melhores propriedades são obtidas por meio da utilização adequada de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER e RETHWISCH, 2018).

Ainda de acordo com Callister, os materiais compósitos podem ser divididos e subdivididos de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 2.5. Tais materiais são formados geralmente por duas fases, uma fase denominada matriz que é contínua e envolve a outra fase que é denominada de fase dispersa. Na presente pesquisa a matriz é composta pela resina epóxi e a fase dispersa corresponde ao tecido de buriti.

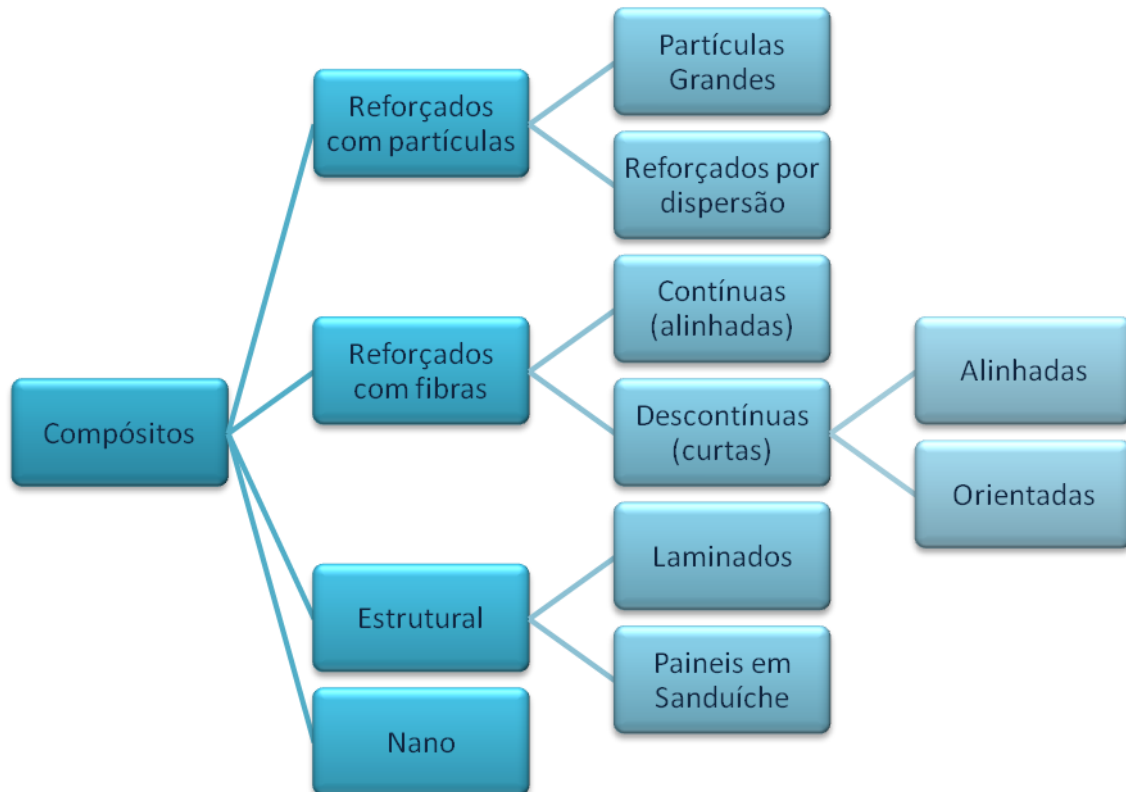


Figura 2.5 - Esquema de classificação para os tipos de compósitos (CALLISTER e RETHWISCH, 2018)

2.2.2.2 Regra das Misturas

A chamada Regra das Misturas tem papel bastante importante no projeto e na estimativa de propriedades mecânicas (EQ. 2.3). Tal equação permite definir a densidade, módulo de elasticidade, dentre outras propriedades.

$$E_{comp} = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{EQ. 2.3}$$

A EQ. 2.3 exemplifica o cálculo para módulo de Elasticidade paralelo as fibras do compósito, onde E_{comp} , E_f e E_m representam o módulo de Elasticidade do compósito, da fibra e matriz, respectivamente. Enquanto V_f e V_m representam as frações volumétricas da fibra e da matriz.

2.2.2.3 Compósitos poliméricos

Como dito anteriormente, os compósitos são formados por uma matriz e por uma fase dispersa. A fase matriz tem papel fundamental no desempenho do compósito e pode ser tanto de polímero termofixo quanto termoplástico. As duas categorias de polímeros são interessantes para aplicar com FNL, entretanto elas apresentam algumas limitações.

Os polímeros termofixos são mais complexos, pois exigem a adição de diversos componentes em sua preparação, tais como, agentes de cura, endurecedores, catalisadores e diluente. Essa complexidade encarece o seu processamento. Algumas técnicas de processamento como, moldagem a frio, laminação contínua e enrolamento filamentar, tem sido usadas, porém, têm-se poucos relatos (FARUK et al, 2012).

Ainda de acordo com Faruk e colaboradores (2012), os polímeros termoplásticos, possuem a facilidade de moldar peças complexas, pois utilizam técnicas simples como, a compressão, a extrusão, a transferência de resina, e dessa forma apresentam baixo custo de processamento. Porém, quando o compósito é formado com FNL a temperatura de processamento é um dos fatores limitantes desse tipo de polímero, pois este fica restrito a uma temperatura em torno de 200°C, já que a partir dessa temperatura as fibras podem apresentar degradação térmica (NABI SAHED e JOG, 1999).

As resinas são substâncias constituídas de partículas de material polimérico, regularmente distribuídas em água ou outro solvente, na forma de gotículas muito finas (WINTER et al., 2014). As resinas termofixas perdem suas propriedades elásticas quando aquecidas na temperatura de distorção.

Tais resinas podem revestir as fibras e os filamentos dos tecidos, formando uma camada de bloqueio para as fibras (CATTANI, 2016). Entretanto, como a fibra possui

característica hidrofílica e a matriz possui característica hidrofóbica, a adesão interfacial desse compósito pode ser dificultosa (BLEDSKI e GASSAN, 1999; MONTEIRO et al, 2011). Além disso, a adesão entre a matriz e a fibra é importante, pois é responsável pela transmissão de tensão, ou seja, se a adesão for baixa, conseqüentemente, o compósito apresentará propriedades finais não satisfatórias (NABI SAHED e JOG, 1999). Entretanto, existem técnicas para promover melhor adesão entre esses dois materiais. Tais técnicas variam desde as mais simples, como remoção da umidade das fibras, até as mais complexas, que podem ser os tratamentos das superfícies com produtos químicos, radiações, enxerto de monômeros e outros (NABI SAHED e JOG, 1999; SAHED et al., 1999; MOHANTY, MISRA e HINRICHSEN, 2000; MONTEIRO et al, 2011).

2.2.2.4 Fibras

Como apresentado na Figura 2.5 os compósitos reforçados com fibras podem ser subdivididos com base em diversos fatores, porém as fibras também são divididas em dois grupos principais, fibras naturais ou sintéticas. Quanto às fibras sintéticas têm-se as fibras de Kevlar®, Twaron®, Dyneema® e Spectra®. E quanto às fibras naturais elas podem ser subdivididas em vegetais (celulósica), animais ou minerais. Como a presente pesquisa tem o objetivo de estudar o comportamento da fibra de buriti em um compósito, os próximos tópicos abordarão as características, propriedades e como se dividem as FNLs.

2.2.2.4.1 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs)

As FNLs podem ser classificadas de acordo com a sua localização no interior da planta, ou seja, a fibra pode ser extraída da semente, fruto, caule, folha e cana (BLEDZKI E GASSAN, 1999; SATYANARYANA et al, 2007; JOHN e THOMAS, 2008; MONTEIRO et al, 2011). A Figura 2.6 representa alguma das possíveis divisões da FNL.

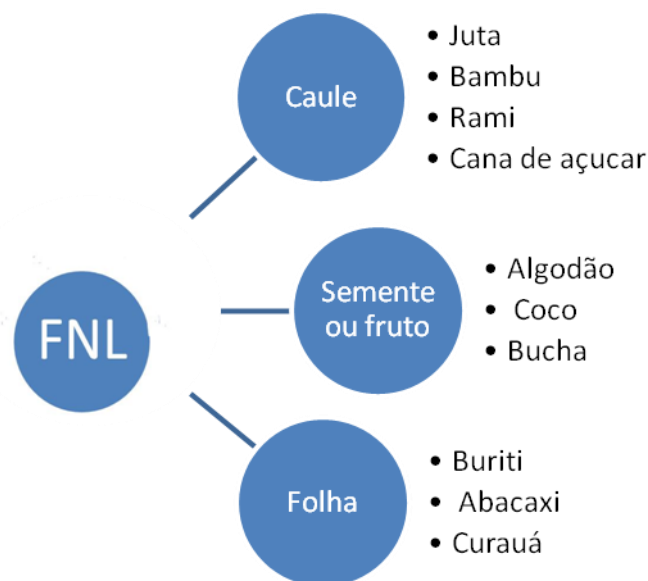


Figura 2.6 - Divisões das FNL de acordo com sua localização de extração (SA SATYANARAYANA et al, 2007).

Nas últimas décadas tem crescido o número de pesquisas que buscam substituir materiais sintéticos por materiais naturais e dentre muitas justificativas destaca-se a abundância, baixo custo e biodegradabilidade, características que trazem benefícios técnicos, sociais e econômicos (LUZ, 2014). Ao incentivar a inserção de materiais naturais em setores industriais, são favorecidas, indiretamente, a geração de emprego e a melhora na qualidade de vida de regiões como no setor rural (SATYANARAYANA et al, 2007).

Ainda de acordo com Satyanarayana e colaboradores (2007), isso contribui para que o Brasil se desenvolva, visto que o país atua como um dos maiores produtores de fibras naturais lignocelulósicas (FNL). Uma vez que as regiões norte e nordeste do país possuem condições favoráveis, como clima adequado e solo fértil, para o desenvolvimento e variedade dessas fibras naturais. Entretanto, existem diversos fatores em diferentes estágios que podem afetar a qualidade da fibra natural, tais como o crescimento das plantas, estágio da colheita, fase de extração da fibra e fase de fornecimento (DITTENBER e GANGARAO, 2012). E ao alterar um desses fatores, altera também a estrutura da fibra, visto que a fibra de uma planta é um composto natural, complexo de várias células (BLEDKI e GASSAN, 1999). As fibras possuem microfibrilas com regiões cristalinas e amorfas (Figura 2.7).

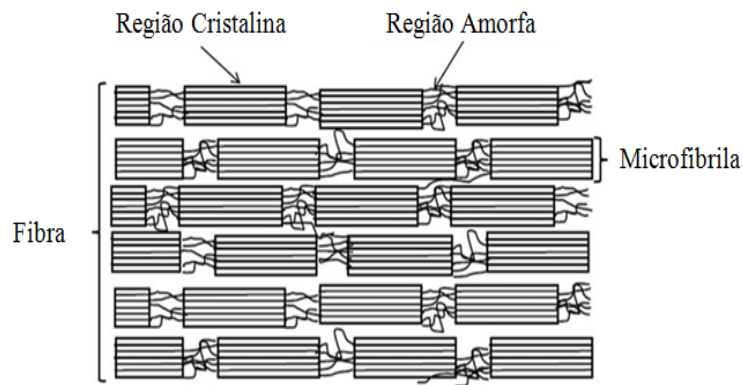


Figura 2.7 - Representação da região cristalina e amorfa dentro da fibra.

Além disso, as fibras são constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, pectinas, e ceras. Nas quais podem ser citadas as características de cada uma como:

- A celulose é um homopolissacarídeo de alto peso molecular composto de unidades b-1,4-anidro-D-glucopirranose que confere suas propriedades mecânicas a células vegetais (THAKUR *et al.*, 2014);
- A hemicelulose consiste de um grupo de polissacarídeos que, com exceção da pectina, permanece associada à celulose após a remoção da lignina (KALIA *et al.*, 2011). Na qual a região cristalina corresponde as fibrilas de celulose incorporadas em uma matriz de hemicelulose e lignina (JOHN & THOMAS, 2008). Inclusive, a hemicelulose possui a característica hidrofílica e consiste em polissacarídeos que são facilmente hidrolisados em ácidos, porém, permanecem associados com a celulose, mesmo depois da remoção da lignina (BLEDSKI e GASSAN, 1999);
- A lignina possui um alto grau de polimerização, atua como um ligante amorfo, com característica hidrofóbica e pode ser diluída em soluções alcalinas.

De outro modo é possível ilustrar o arranjo da fibra através da Figura 2.8, onde a fibra consiste em uma estrutura complexa com parede primária e secundária, sendo a parede secundária subdividida em três camadas (S1, S2 e S3), nas quais as microfibrilas estão arranjadas de forma helicoidal.

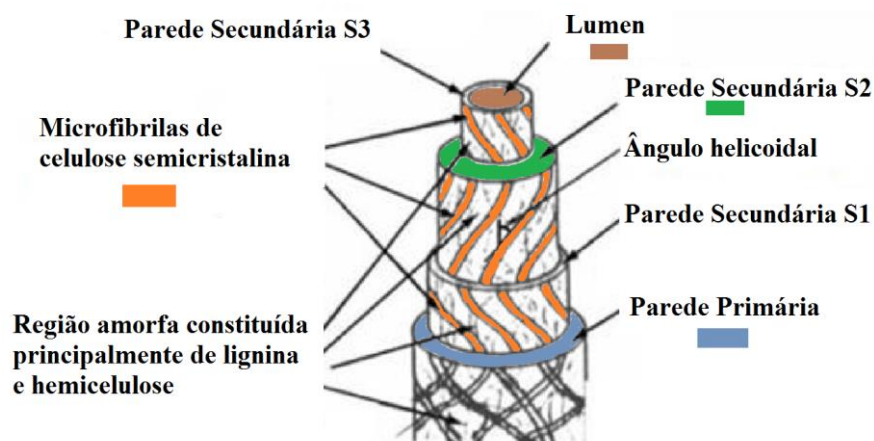


Figura 2.8 - Representação esquemática de uma fibrila (JOHN e THOMAS, 2008 e KALIA et al, 2011) (adaptado).

O ângulo formado entre o eixo da fibra e as microfibrilas é chamado o ângulo microfibrilar e varia de uma fibra para outra, assim como, a razão entre celulose e lignina/hemicelulose. E o tubo central corresponde ao lúmen da fibra, região responsável por reter água. Quanto maior for o diâmetro do lúmen, menor será a resistência da fibra (SATYANARYANA et al 1990, KALIA *et al*, 2011).

A diversidade de fibras é muito grande, contudo existem algumas características que permitem identificar as fibras. Em outras palavras, as fibras podem ser distinguidas através do teor de celulose, lignina, ângulo microfibrilar, teor de umidade, grau de polimerização e o diâmetro do lúmen (SATYANARYANA *et al*, 1984; SATYANARYANA *et al*, 1990; BLEDSKI e GASSAN, 1999). A Tabela 2.2 apresenta essas características para algumas fibras e é possível observar que a celulose apresenta resistências superiores que a hemicelulose (BLEDSKI e GASSAN, 1999).

Tabela 2.2 - Características básicas e propriedades que diferem uma fibra da outra.

	Algodão	Juta	Linho	Rami	Sisal	Buriti	Referência	
Constituição básica de algumas fibras vegetais	Celulose	82,70	64,40	64,10	68,60	65,80	51,29	
	Hemicelulose	5,70	12,00	16,70	13,10	12,00	18,80	
	Pectina	5,70	0,2	1,8	1,9	0,8	-	
	Lignina	-	11,8	2	0,6	9,9	16,37	BLEDZKI E GASSAN, 1999.
	Solúvel a água	1,00	1,1	3,9	5,5	1,2	-	
	Cera	0,60	0,5	1,5	0,3	0,3	-	
	Água	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	-	
Diâmetro do Lúmen (mm)	-	0,08	10	0,015	0,20	0,6	MONTEIRO et al, 2011.	

*Os dados sobre a constituição básica da fibra de buriti são de acordo com BARBOSA, 2011.

As fibras naturais não possuem propriedades uniformes como as fibras sintéticas. As microestruturas das FNL apresentam características de heterogeneidade, defeitos, superfícies acidentadas e possuem limitação dimensional (MOHANTY et al, 2000). Além disso, as fibras naturais podem obter resistências maiores quanto menor for o diâmetro (BLEDSKI e GASSAN, 1999; MONTEIRO et al, 2011; LUZ, 2014).

Por fim, outra desvantagem das fibras naturais é o comprimento limitado. Um dos artifícios para melhorar essa característica é a produção de fios contínuos que podem ser enrolados em bobinas. Com isso, criou-se a produção de tecidos, nos quais a presença da trama das fibras nas duas direções auxilia em trabalhos mecânicos, podendo ter diferentes orientações.

2.2.2.4.2 Arranjo

Como dito anteriormente, uma das desvantagens das FNL é devido ao seu comprimento, e uma das alternativas para melhorar essa característica é utilizando tecidos. De acordo com LUZ (2014), o desenvolvimento de tecnologias têxteis confere propriedades mecânicas melhores aos compósitos. Na maioria das técnicas de processamento descritas acima, pode-se utilizar diferentes tipos de arranjos das fibras, de forma a otimizar seu desempenho.

John e Thomas (2008) desenvolveram um estudo no qual foram analisados alguns tipos de arranjos para tecidos confeccionados com FNL. Dentre os modelos estudados destacam-se: a trama simples (Figura 2.9). O arranjo simples é o mais utilizado comercialmente, devido à facilidade de trançar, pois os fios são entremeados de forma ortogonal e alternados por baixo e por cima de cada fio de fibra da trama. No entanto, possui propriedades mecânicas relativamente baixas em comparação com os demais arranjos. O intuito de destacar apenas a trama simples é por que o tecido de buriti utilizado nessa pesquisa apresenta característica similar.

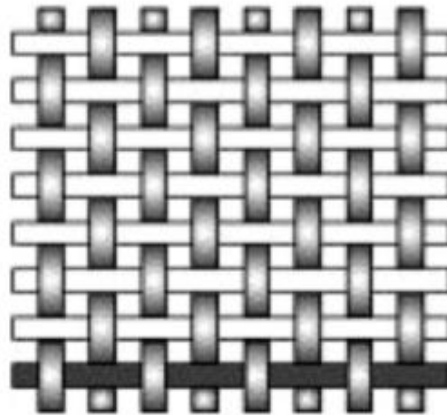


Figura 2.9 - Exemplo da trama de tecido do tipo simples. (John e Thomas, 2008) (adaptado).

A utilização de tecidos de FNL em SBM é uma aplicação consolidada no IME. Outros autores destacam a eficiência da blindagem, em termos de redução na profundidade de impacto devido à eficiência na distribuição de tensões e deformações proporcionada pela utilização de tecidos de FNL (LUZ, 2014; BRAGA, 2015; MILANEZI, 2015; NASCIMENTO, 2017). Tal característica é justificada por uma série de fatores, dentre elas atrito entre os fios e o projétil, tipo da resina utilizada como matriz, estrutura do tecido, trama, filamento dos fios e propriedades mecânicas e térmicas das fibras (AFSHARI, CHEN e KOTEK, 2012).

2.2.2.4.3 Fibra de Buriti

A fibra de Buriti (*Mauritia Flexuosa*) é oriunda de uma palmeira amplamente distribuída na Amazônia, Brasil Central, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais e Piauí (SARAIVA, 2009). Uma representação do mapa brasileiro com as regiões que predominam o Buriti nota-se que são regiões de clima tropical, temperatura média anual 26° a 30°, com teor de pluvial de 200mm a 400mm (Figura 2.10) (CATTANI, 2016).



Figura 2.10 - Representação no mapa do Brasil dos locais que possuem palmeiras de Buriti.
Adaptado (LORENZI, 1992).

Ainda de acordo com Cattani (2016), algumas características da palmeira é que ela pode chegar a 40m de altura e o diâmetro do caule da árvore é entre 50 e 60cm (Figura 2.11.a). As folhas possuem o comprimento superior a 15 cm e à medida que as folhagens morrem, elas ainda permanecem em seu estipe por algum tempo antes de caírem (Figura 2.11.b). As folhagens são utilizadas para a fabricação de artesanatos ou para servir de cobertura para as residências das comunidades. O fruto, Buriti, possui características como escamas córneas de cor castanho-avermelhado e a parte interna (polpa da fruta) possui a cor alaranjada. A polpa pode ser utilizada para alimento humano, isca para caça, óleo e fins medicinais (Figura 2.11.c).

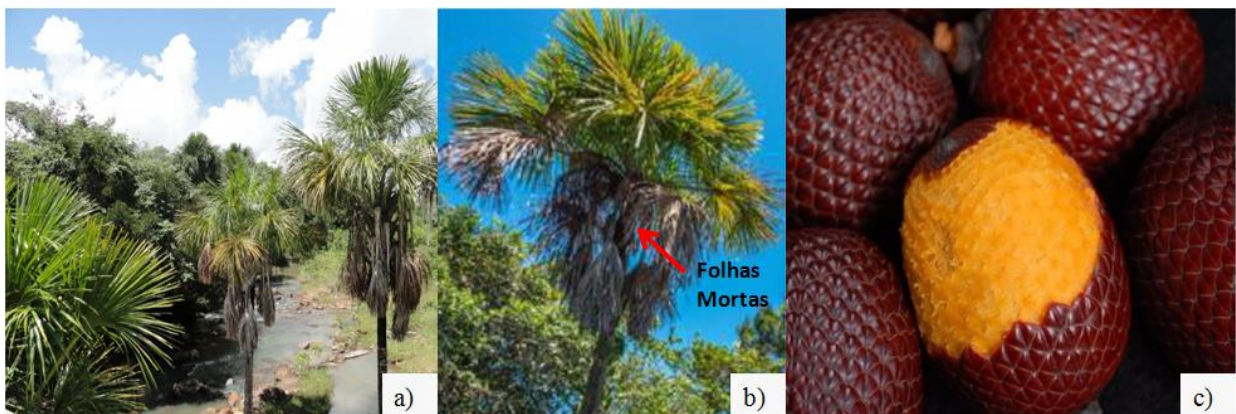


Figura 2.11 - Representação da Palmeira de Buriti (a) copa da árvore em comparação com as demais (b) folhas mortas ainda presas na árvore e (c) fruto.

A extração da fibra de buriti é realizada de forma artesanal onde os habitantes das zonas rurais sobem nas arvores, retiram as folhas verdes e realizam a o corte das fibras. Essas fibras podem ser retiradas das folhas (linho) ou do pecíolo (Figura 2.12.a). O tecido de buriti usado nessa pesquisa é oriundo do linho da palmeira com uma trama simples (Figura 2.12.b).

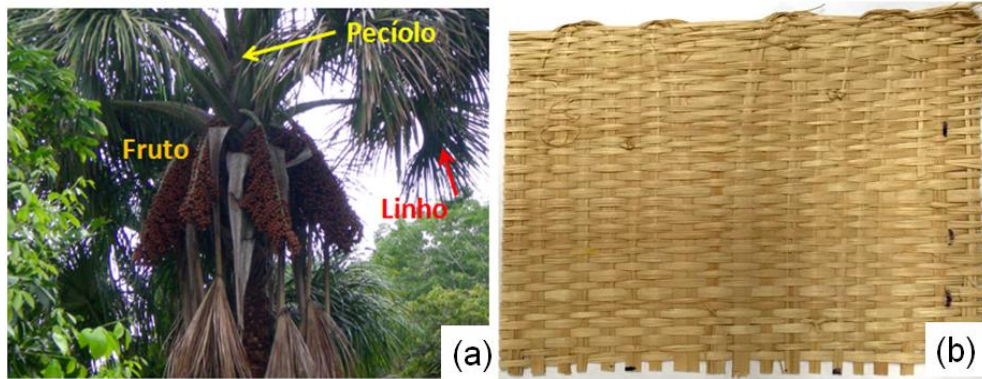


Figura 2.12 - Representação das (a) áreas que podem ser extraídas as fibras, o pecíolo, fruto e o linho da palmeira e (b) tecido de buriti utilizado nessa pesquisa.

Todavia, o conhecimento sobre as propriedades e características físico-químicas inerentes à fibra de buriti é essencial para previsão do comportamento desse material quando utilizado como reforço em compósitos de matriz polimérica. A Tabela 2.3 apresenta algumas propriedades típicas da fibra de buriti.

Tabela 2.3 - Propriedades típicas das fibras de Buriti.

Propriedade	Valor	Referências
Massa específica (g/cm^3)	0,911	BARBOSA, 2011
Resistência à Tração (MPa)	492,74	SANTOS, 2010
Módulo de Elasticidade (GPa)	24	BARBOSA, 2011
σ/ρ Max ($\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$)	403	MONTEIRO et al, 2011

Com base nas propriedades e características apresentadas pelas fibras de buriti, diversos pesquisadores sugerem a utilização dessa fibra como reforço de compósitos de matriz polimérica (SANTOS, 2010; BARBOSA, 2011; MONTEIRO *et al*, 2011; CATTANI, 2016).

2.2.2.4.4 Mecanismos de fratura do compósito reforçado com fibra

Os compósitos reforçados com FNLs possuem a capacidade de interromper, pelas interfaces existentes das fibras, a propagação de trincas internas através da alteração do estado de tensão atuante na fratura. Sobretudo, é possível melhorar os materiais compósitos por meio da característica da falha apresentada, principalmente no caso de aplicações de responsabilidade, como na utilização em blindagem balística (ALMOND, EMBURY e WRIGHT, 1969; ANDERSON, 1995; MORYE et al, 2000).

Ainda de acordo com o Morye e colaboradores, a fratura não ocorre de modo catastrófico, mas de acordo com o percentual de fibras que reforçam o compósito. Com um teor de reforço de 20% volume de fibras naturais é possível verificar que a falha tende a ser progressiva, e o compósito passa a falhar por meio de uma combinação de mecanismos de fratura (NASCIMENTO, 2017). Alguns dos mecanismos de falha mais comuns nos compósitos reforçados com fibras estão ilustrados na Figura 2.13.

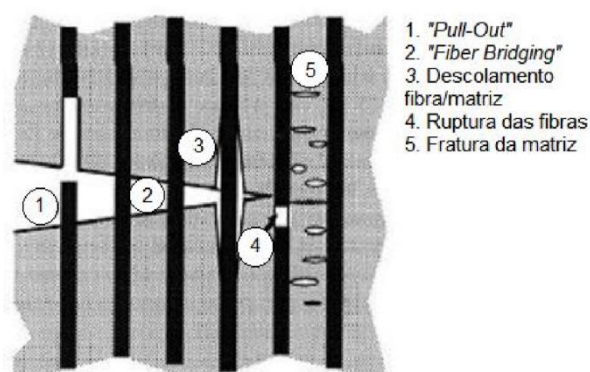


Figura 2.13 - Mecanismos de falhas que podem estar associados a compósitos reforçados por fibras (ANDERSON, 1995).

Os mecanismos de falha que podem ocorrer nos compósitos reforçados por fibras são: arrancamento de fibras (*pull-out*), ponte de fibras (*fiber bridging*), descolamento fibra/matriz, ruptura das fibras, trincamento da matriz e a delaminação, que ocorre normalmente em compósitos reforçados por tecidos (NASCIMENTO, 2017).

De outro modo, como os compósitos serão submetidos a ensaios balísticos os danos produzidos no compósito no momento do impacto e após a penetração do projétil estão apresentados esquematicamente na Figura 2.14. No primeiro estágio, o material compósito é

comprimido pelo projétil aumentando a sua resistência ao cisalhamento sem a ruptura da camada frontal das fibras. No segundo estágio, essa camada frontal de fibras é rompida pelo projétil e ocorre a delaminação de algumas camadas do material compósito (BHATNAGAR, 2006; WESTIN et al, 2011; LUZ, 2014, NASCIMENTO, 2017; GARCIA, 2018) .

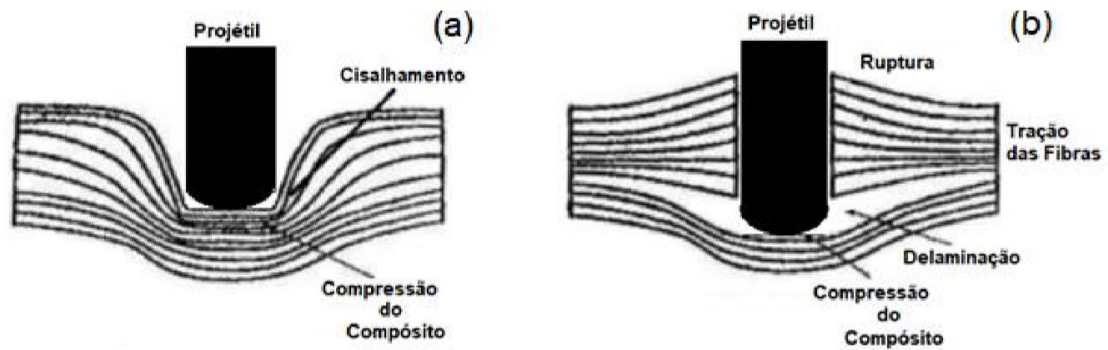


Figura 2.14 - Esquema ilustrando as etapas do mecanismo de delaminação dos compósitos reforçados com fibras (a) antes da ruptura e (b) depois da ruptura. Adaptado de (BHATNAGAR, 2006; WESTIN et al, 2011; LUZ, 2014; NASCIMENTO, 2017; GARCIA, 2018)

A delaminação, separação das camadas dos compósitos, é um mecanismo de absorção de energia de impacto que ocorre quando a adesão entre as camadas é menor que os esforços do impacto. Na delaminação, a formação de novas superfícies, devido à separação das camadas, é responsável por absorver a energia de impacto (BHATNAGAR, 2006; LUZ, 2014).

2.2.3 Camada Terciária

2.2.3.1 Material Metálico

A última camada da blindagem, também chamada de camada anti-trauma, é formada mais comumente por um material deformável, comumente um material metálico, que tem por finalidade reduzir o dano potencial no corpo do usuário causado pela deformação dinâmica da

blindagem (WANG, 2014; WILKINS, 1978; BRAGA, 2015). A camada metálica não será objeto de estudo do presente trabalho.

2.2.3.2 Aramida

As fibras de aramida foram desenvolvidas no final da década de 1960, pelos cientistas da empresa Dupont, que são comercialmente conhecidas como Kevlar® (BHATNAGAR, 2006). São aplicadas principalmente no setor de blindagem balística, onde quando aplicadas em coletes (nível III-A), são capazes de absorver a energia cinética de projeteis providos de arma de fogo com velocidade de impacto inferior a 420 m/s (BHATNAGAR, 2006; NIJ 0101.04, 2000). Quando aplicados em sistema de blindagem multicamada (nível III), sendo utilizadas como a segunda camada do sistema, são responsáveis em absorver em até 37% da energia cinética de projeteis que possuem velocidade acima de 830 m/s (MONTEIRO et al., 2014; DA SILVA, 2014b).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ASPECTOS GERAIS

A preparação das amostras para blindagem multicamadas foi executada em três etapas. Primeiramente produziram-se as cerâmicas, posteriormente foram produzidos os compósitos e por último as camadas foram coladas com poliuretano. Os tópicos seguintes apresentarão detalhadamente os processos de cada etapa.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Camada Primária: Cerâmica

As cerâmicas utilizadas nessa pesquisa consistiram em dois grupos. O primeiro grupo é o de controle composto pelos pós de Alumina (Al_2O_3) dopada com Nióbia (Nb_2O_5) e o segundo grupo é composto com estes dois componentes e aditivada com o Fluoreto de Lítio (LiF). O LiF foi adicionado na proporção de 0,5% na mistura, não influenciando na sequência de produção das placas cerâmicas.

- i. [100% (96% Al_2O_3 + 4% Nb_2O_5)]
- ii. [100,5% (96% Al_2O_3 + 4% Nb_2O_5) + 0,50%LiF]

3.2.1.1 Alumina e Nióbia

A alumina (Al_2O_3) foi fornecida pela empresa Treibacher Schleifmittel Brasil Ltda, a nióbia (Nb_2O_5), utilizada como aditivo de sinterização na alumina, foi fornecida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). As análises químicas da alumina e da nióbia estão apresentadas nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Composição química da Alumina

Elemento	Quantidade (%)	Especificação (%)
Al ₂ O ₃	99,4	Mín. 99,1
SiO ₂	0,04	Máx. 0,06
Fe ₂ O ₃	0,04	Máx. 0,06
Na ₂ O	0,11	Máx. 0,15
Umidade a 300°C	0,20	Máx. 0,50

Fonte: Adaptado de Trindade, 2012.

Tabela 3.2 - Composição química da Nióbia.

Elemento	Quantidade
Nb ₂ O ₅	99,5 %
Perda ao fogo	0,10 %
Ta	745 ppm
Ti	240 ppm
Fe	136 ppm
Sn	95 ppm
Si	66 ppm

Fonte: Adaptado de Trindade, 2012.

3.2.1.2 Fluoreto de Lítio

O fluoreto de lítio (LiF) da marca Vetec, assim como a nióbia, foi utilizado como aditivo de sinterização da alumina. A análise química do LiF está apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química do Fluoreto de Lítio.

Elemento	Quantidade (%)
LiF	98,0
Cl	0,02
HF	0,02
SO ₄	0,02
Fe	0,005
Cu	0,005
Ni	0,005
Pb	0,005

Fonte: Adaptado de Santos, 2016.

3.2.1.3 Polietilenoglicol

O polietilenoglicol é um ligante orgânico fornecido pela Vetec Química Fina Ltda que foi adicionado para conferir uma resistência mecânica ao corpo verde, a fim de facilitar o manuseio durante o processo cerâmico. Além disso, ele permite reduzir a tensão superficial da mistura cerâmica, garantindo uma homogeneização adequada e eficiente das substâncias envolvidas (CHIMELLI, 2010; JESUS, 2014; SANTOS, 2016). Os dados e propriedades do PEG estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Propriedades do polietilenoglicol.

Elemento	Quantidade (%)
Metais pesados	Máx. 5 ppm
Resíduo após ignição	Máx. 0,1%
Cor (APHA)	Máx. 25
Viscosidade a 99°C (CST)	6,8 - 8,0
Água máx.	Água máx. 0,2%
Óxido de Etileno	Máx. 10 ppm
Massa molecular, calculado como OH	380 – 420
Índice de hidroxila	267,1 - 295,3 mg KOH/g

Fonte: Fornecedor, Vetec Química Fina Ltda.

3.2.2 Camada Secundária: Compósito

Os compósitos foram confeccionados nos teores de reforço de 10, 20 e 30% de tecido de buriti e os materiais utilizados para a produção estão nos próximos subitens, bem como a aquisição dos tecidos.

3.2.2.1 Resina epóxi e endurecedor

A confecção dos compósitos utilizou uma resina comercial à base de epóxi do tipo éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), endurecida com trietileno tetramina (TETA). Ambas fabricadas pela Dow Chemical do Brasil e fornecidas pela distribuidora Epoxyfiber Ltda. A razão utilizada é feita por meio de um cálculo estequiométrico de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina (Figura 3.1). Ademais, a fim de garantir uma eficiente molhabilidade das fibras, e por conseguinte, uma adequada aderência com a matriz, considerou-se um excesso de 30% p nos cálculos da mistura epóxi-endurecedor.



Figura 3.1 - Resina epóxi e endurecedor - Epoxyfiber.

3.2.2.2 Tecido de Buriti

Os tecidos de buriti foram adquiridos no Mercado Municipal Adolpho Lisboa, centro da cidade de Manaus. Os tecidos foram confeccionados manualmente, com trama simples, por comunidades indígenas do interior do Amazonas. Os tecidos foram cortados nas dimensões de 12 x 15 cm e colocados na estufa a 60°C por 24h para retirar a umidade no tecido e melhorar a adesão entre a resina epóxi e a fibra. O tecido de buriti possui uma espessura de 0,60 mm (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Aspecto geral do tecido de buriti.

3.2.3 Camada Terciária: Liga de alumínio e Aramida

A terceira camada é composta por dois grupos amostrais, o primeiro grupo amostral utiliza uma placa de alumínio e o segundo grupo amostral consiste em utilizar 12 camadas de tecido de aramida. Vale ressaltar que os SBM com a terceira camada sendo a placa de alumínio já atuam como um nível III de proteção, atendendo ao critério estabelecido pela NIJ 0101.04 (2000). Contudo, muitas vezes os coletes nível III-A são apenas transformados para o nível III por meio da colocação do preenchimento com uma placa balística na parte frontal.

3.2.3.1 Placa de Alumínio

As placas de alumínio são formadas pela liga de Alumínio 5052 H34 e foram fornecidas pela empresa Metalak. As chapas possuem as dimensões 120 x 150 x 5,00 mm (Figura 3.3).

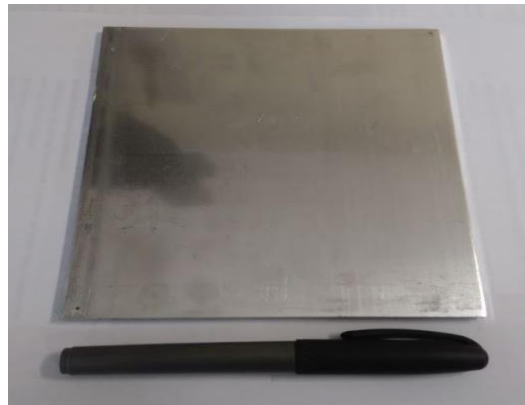


Figura 3.3 - Chapa de liga de alumínio 5052 H34.

Os valores fornecidos pelo fabricante, e as especificações de resistência à tração (σ_T), limite de escoamento (σ_e), ductilidade (Δ_L/L_0) da liga são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas nominais da liga de alumínio utilizada (BRAGA, 2015)
(adaptado)

Propriedade	Valor	Especificação
σ_T (MPa)	249	Min. 235 Max. 285
σ_e (MPa)	205	Min. 180
Δ_L/L_0 (%)	10	Min. 10

3.2.3.2 Tecido de Aramida

O tecido de aramida foi utilizado devido ao seu alto grau de ordenamento de suas cadeias moleculares. Tal polímero sintético apresenta excelentes propriedades físicas e mecânicas, como ilustrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Propriedades da fibra de Aramida (Adaptado CALLISTER & RETHWISCH, 2018)

Densidade	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Calor Específico (J/Kg·K)
1,44	131	3600-4200	1300

Os tecidos de aramida utilizados na presente pesquisa foram da marca Kevlar® S745 (fio K29), fabricado pela DuPont e fornecidos pela empresa LFJ Blindagens Com. Serv. S.A. (Figura 3.4). Foram utilizadas 12 camadas de tecido e foram colados com uma cola a base de poliuretano. A espessura final desses tecidos foi de aproximadamente 6,5mm para compor o SBM.

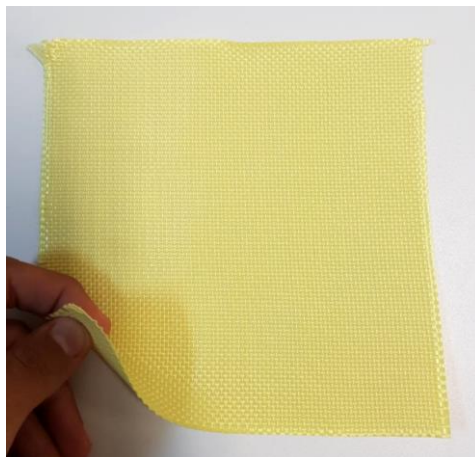


Figura 3.4 - Aspecto geral do tecido de Kevlar®.

3.3 MÉTODOS UTILIZADOS

3.3.1 Fabricação dos corpos cerâmicos

A cerâmica utilizada na presente pesquisa consistiu na produção de um grupo amostral de cerâmica de Alumina (Al_2O_3) dopada com Nióbia (Nb_2O_5) e outro grupo amostral com estes dois componentes aditivadas com o Fluoreto de Lítio (LiF). O objetivo era analisar o

comportamento do LiF na blindagem balística e verificar se a presença do composto melhoraria as propriedades de absorção de energia do projétil. O LiF foi adicionado na proporção de 0,5% na mistura, não influenciando na sequência de produção das placas cerâmicas. A mistura dos pós cerâmicos começou com a pesagem dos elementos na seguinte concentração:

- Alumina (700 g – 94,5% p);
- Nióbia (29,15 g – 3,94% p);
- Álcool etílico hidratado 92,8° INPM (750ml) para possibilitar a mistura dos pós;
- Fluoreto de Lítio (3,702 g - 0,5%);
- Ligante líquido PEG 400 (11,3 g – 1,53%).

O PEG foi aquecido a 70°C para facilitar a mistura com os demais componentes e para potencializar as propriedades do ligante (GOMES, 2004; SANTOS, 2016). Os materiais foram colocados no moinho de bolas (Figura 3.5.a) durante um período de 8h para homogeneizar a mistura e posteriormente foram colocados na estufa (Figura 3.5.b) para secar a uma temperatura de 100°C por um período de 24h.

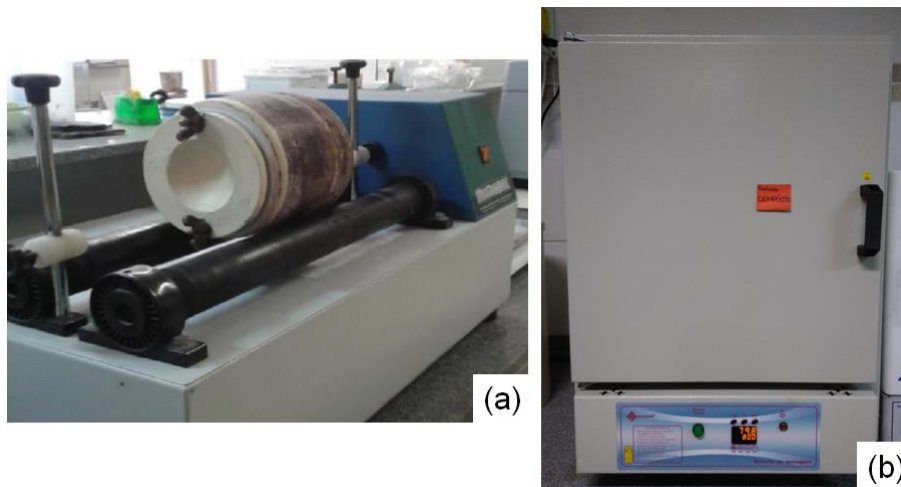


Figura 3.5 - (a) Moinho de bolas da marca MARCONI utilizado no processamento e (b) estufa utilizada para secar os pós cerâmicos.

A mistura foi retirada da estufa e, com o auxílio do almofariz e pistilo (Figura 3.6.a), iniciou o processo de macerar a massa cerâmica até obter um pó. Na sequência, os pós foram colocados na peneira de abertura de 0,255 mm com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 3.6.b) (SANTOS, 2017).

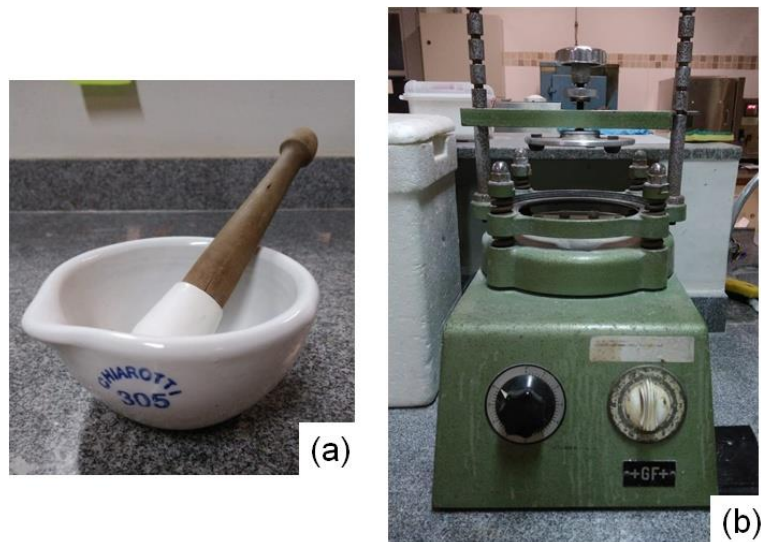


Figura 3.6 - Equipamentos utilizados no processamento cerâmico (a) almofariz e pistilo e (b) agitador.

Em seguida, com granulometria definida, os pós foram colocados dentro de uma matriz hexagonal metálica Figura 3.7.a. Com o auxílio de uma prensa hidráulica da marca SKAY, com capacidade de 30 toneladas, Figura 3.7.b, aplicou-se uma carga de 30 MPa (12 T) com isso foram obtidos os corpos verdes (CV). Os corpos verdes foram colocados em um forno da marca INTI modelo FE-1700 para serem sinterizados conforme a Figura 3.7.c. A quantidade de pó utilizada nessa pesquisa foi equivalente a estudada por Santos (2017) e Trindade (2012), em que após sinterização, cada amostra tivesse 10mm de espessura. (tensão de compactação)

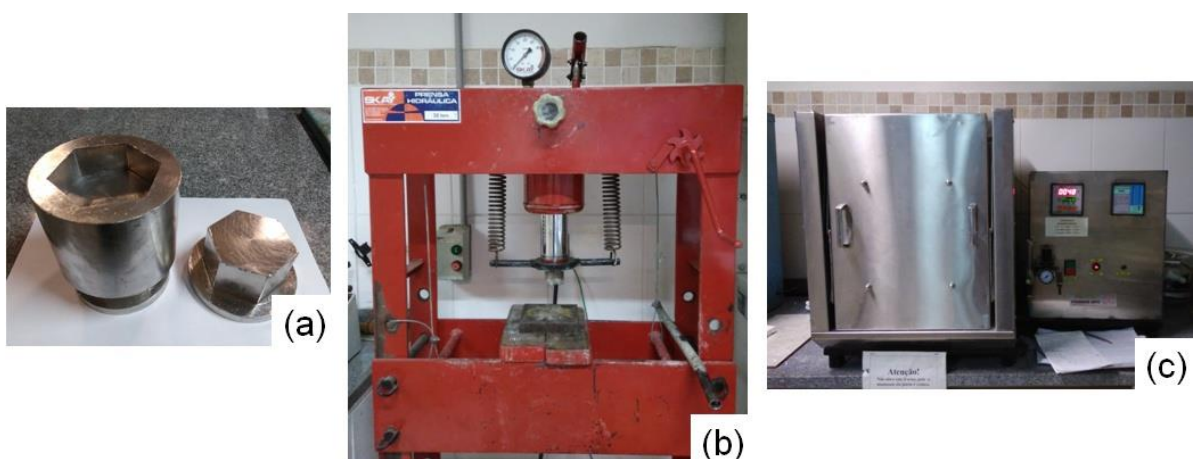


Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para produzir os corpos cerâmicos (a) matriz metálica, (b) prensa e (c) forno.

O forno foi ajustado nas taxas e patamares discriminados abaixo e ilustrado na Figura 22. A condição adotada é baseada nas pesquisas que foram realizadas no IME (GOMES, 2004; TRINDADE, 2013; CHAGAS, 2014; LUZ, 2014; BRAGA, 2015; NASCIMENTO, 2017). Os patamares representam a eliminação do ligante, potencialização do aditivo desinterização LiF e sinterização total da alumina com nióbia, respectivamente.

- 1) Aquecimento de 25°C até 158°C à taxa de 1°C/min;
- 2) Patamar de aquecimento de 158°C por 1h;
- 3) Aquecimento de 158°C até 375°C à taxa de 1°C/min;
- 4) Aquecimento de 375°C até 1000°C à taxa de 8°C/min;
- 5) Patamar de aquecimento de 1000°C por 1h;
- 6) Aquecimento de 1000°C até a temperatura final de sinterização (1400°C) à taxa de 5°C/min;
- 7) Patamar de sinterização à temperatura final de sinterização (1400°C) por 3h.

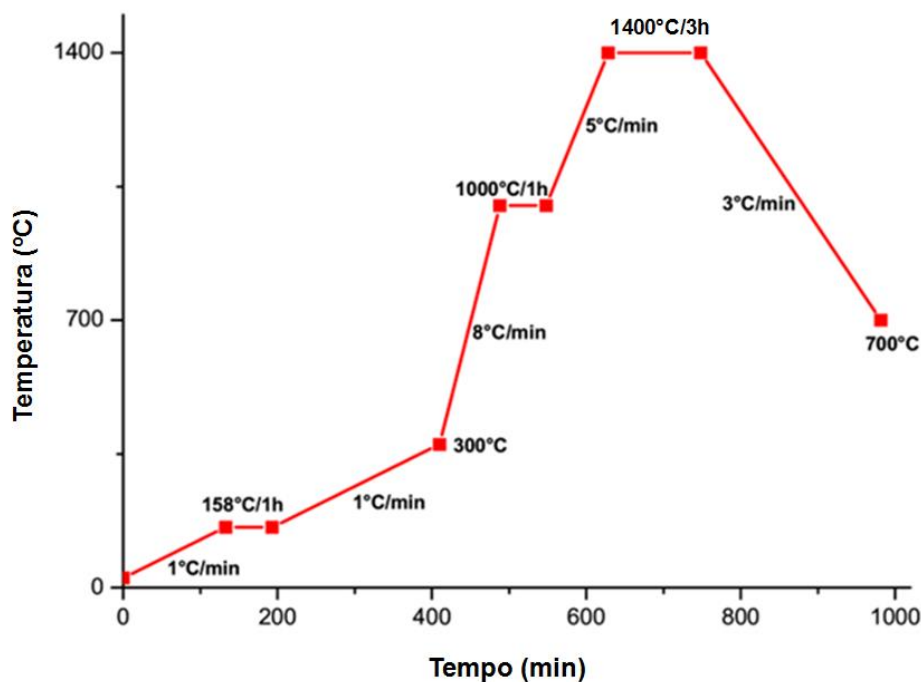


Figura 3.8 - Taxas e patamares utilizados no forno para sinterizar as peças cerâmicas.

3.3.1.1 Caracterização dos corpos cerâmicos

Uma possibilidade de verificar se as peças cerâmicas foram sinterizadas de forma adequada é calculando a densificação dos corpos, ou seja, por meio do ensaio de Arquimedes

são calculadas as densidades das amostras sinterizadas (ABNT NBR 16661:2017). Este método considera os poros abertos, por isso utilizou-se essa técnica. A densidade teórica adotada para a composição da cerâmica dopada com LiF foi de 3,9980 (g/cm³) e a densidade teórica adotada para a composição da cerâmica sem o LiF foi de 4,0048 (g/cm³) (SANTOS, 2016).

Como o objetivo era analisar a sinterização das amostras cerâmicas neste ensaio foram produzidas peças cerâmicas nas dimensões de 17 mm diâmetro e 6 mm de espessura (Figura 3.9.a). Para produzir as peças utilizou-se 5 gramas do pó cerâmico e utilizou-se também uma outra matriz metálica com 20 mm de diâmetro interno (Figura 3.9.b).

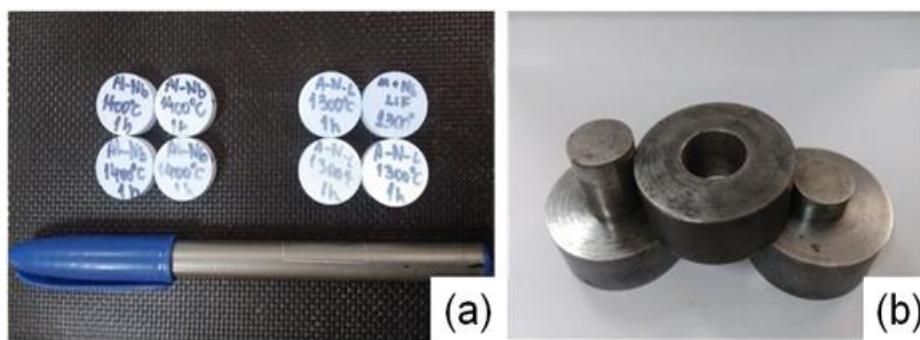


Figura 3.9 - Ensaio para caracterização das pastilhas cerâmicas (a) cerâmicas produzidas e (b) matriz metálica utilizada.

3.3.2 Produção do compósito

Os compósitos epóxi-tecido de buriti foram preparados com o auxílio de um molde metálico de dimensões 12 x 15 x 1,19 cm³ (Figura 3.10.a). Uma fina camada de graxa de silicone (Figura 3.10.b) foi aplicada com o intuito de atuar como desmoldante, facilitando a remoção dos corpos após a prensagem.

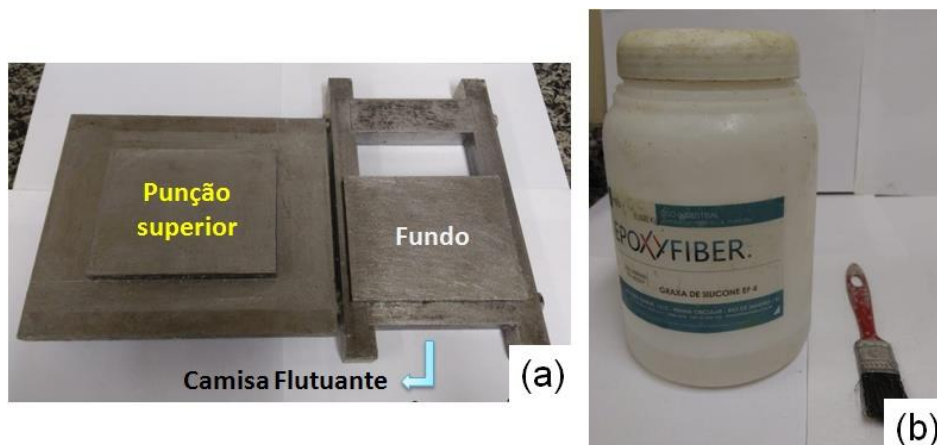


Figura 3.10 - Equipamentos utilizados para produzir os compósitos (a) matriz metálica e (b) graxa de silicone usada para desmoldar os compósitos.

Os tecidos foram colocados manualmente na matriz e molhados com a mistura de resina e endurecedor. A fim de garantir uma eficiente aderência entre as fibras e a resina polimérica, considerou-se um excesso de 30%p nos cálculos da mistura epóxi-endurecedor. O compósito foi prensado, com o auxílio de uma prensa de 15 toneladas da marca SAKY (Figura 3.11.a), a uma carga de 3 MPa (5 T) durante 24h (Figura 3.11.b).

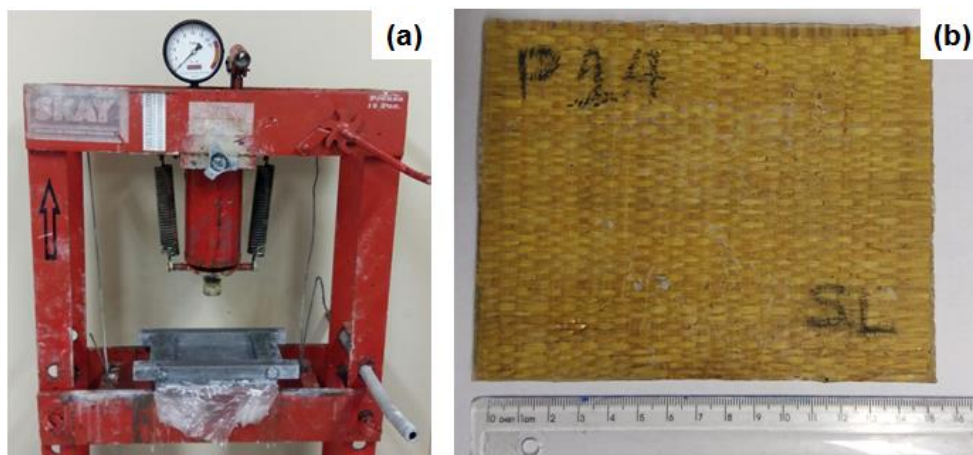


Figura 3.11 - Produção dos compósitos (a) resina e endurecedor, (b) prensa SAKY e (c) compósitos.

3.3.3 Montagem do SBM

O SBM foi montado colando as três camadas, corpo cerâmico, compósito, alumínio, com uma cola à base de poliuretano da marca GOLDEN GLASS (Figura 3.12.a). De modo a evitar

que o poliuretano influenciasse nos resultados, utilizou-se uma fina camada aderindo as três camadas. A Figura 3.12.b exemplifica a terceira camada do SBM feita com placa de alumínio e a Figura 3.12.c exemplifica o SBM utilizado como inserto produzido com os tecidos de aramida.

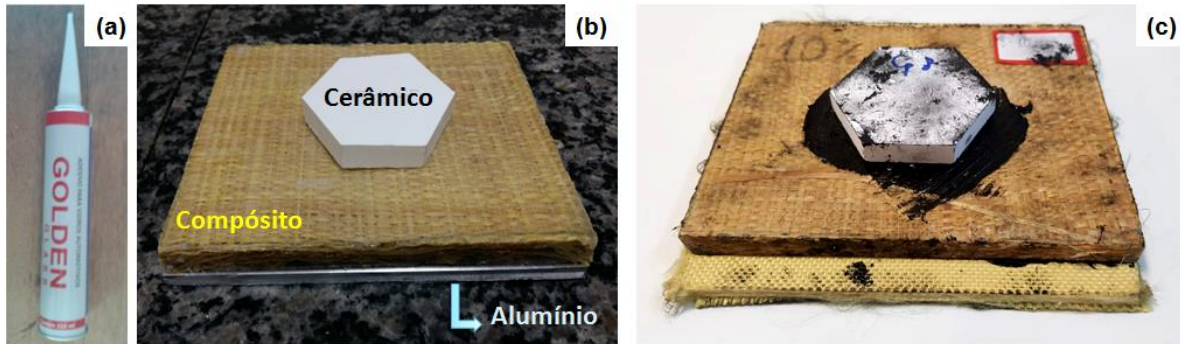


Figura 3.12 - Cola à base de poliuretano para aderir os diferentes materiais que compõe o SBM e SBM (b) com chapa de alumínio e (c) com tecidos de aramida.

3.3.4 Ensaio Balístico

As amostras foram analisadas em dois ensaios balísticos diferentes, entretanto, ambos verificaram a capacidade de absorção de energia cinética. O primeiro ensaio consistiu em analisar o compósito de forma isolada, onde verificou-se a energia cinética absorvida pelo compósito com tecido de buriti através da velocidade residual. Enquanto que o segundo ensaio foi realizado em SBM, o qual foi utilizado para avaliar a profundidade da indentação na plastilina proporcionada pelo disparo do projétil.

Citar a importância da barreira ótica

As condições utilizadas nos ensaios balísticos consistem no seguinte caso:

- i) **Munição:** Calibre 7,62 mm M1 (Figura 3.13), conforme e fornecida comercialmente ao Exército; com projétil de massa de 9,7 gramas;
- ii) **Dispositivo:** Provete calibre 7,62 mm (Figura 3.13) e um dispositivo de fixação do alvo;
- iii) **Distância do alvo:** 15 metros, conforme previsto na norma NIJ 0101.04 para as munições 7,62 mm (Figura 3.13);
- iv) **Ângulo de incidência no alvo:** 90°;

v) **Local:** Centro de Avaliações do Exército - CAEx.

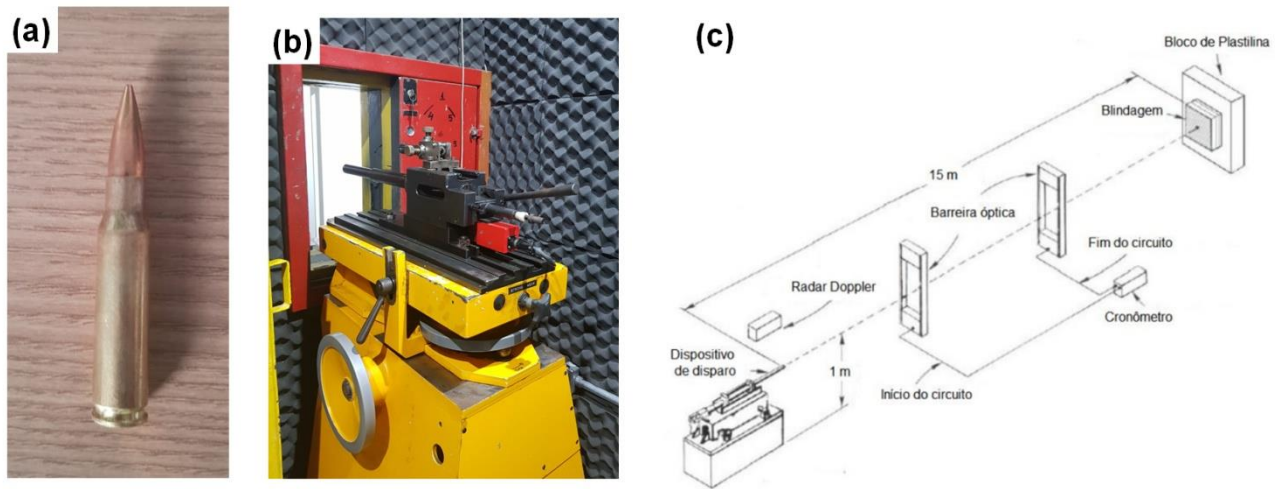


Figura 3.13 - (a) Munição 7,62mm M1, (b) Provete com mira laser e (c) Esquema do sistema utilizado com barreira óptica modelo B471 da HPI.

3.3.4.1 Ensaio balístico velocidade residual

As amostras dos compósitos de tecido de buriti submetidas a este ensaio possuem as dimensões 1,0 x 6,0 x 7,5 cm, com um grupo amostral de 8 placas para cada teor de reforço (10, 20 e 30% v). As amostras foram fixadas em um suporte (Figura 3.14.a) e com o auxílio do radar Doppler, modelo Weibel - SL520P (Figura 3.14.b) verificou-se a velocidade do projétil antes e após o impacto.

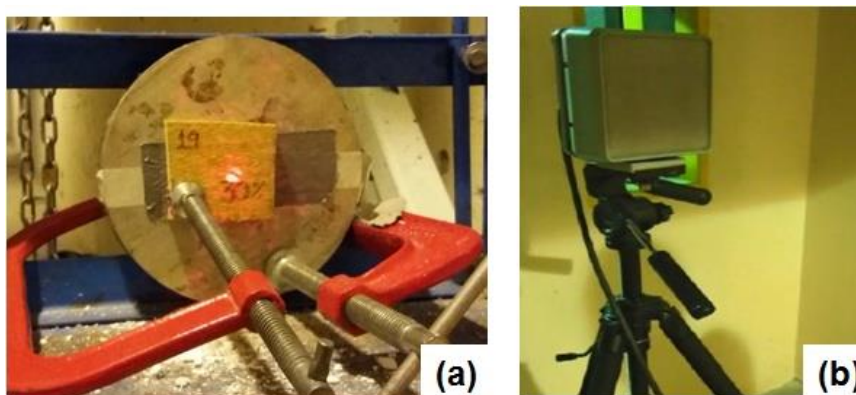


Figura 3.14 (a) Aparato para medição da velocidade residual e (b) Radar doppler, modelo SL-520P do CAEx (LUZ, 2014) (adaptado).

De posse dos dados fornecidos pelo radar Doppler foi possível calcular a velocidade limite definida pelas EQ. 2.1 e 2.2.

3.3.4.2 Ensaio balístico Plastilina

Para este ensaio serão produzidas dez (10) amostras para cada teor de reforço (10, 20 e 30% v), dentre elas cinco (5) são com pastilha cerâmica de alumina e nióbia e as outras cinco (5) são de alumina, nióbia e fluoreto de lítio. Os SBMs foram fixados em um bloco de plastilina (CORFIX™) (Figura 3.15.a) com 5 cm de espessura. A plastilina possui uma consistência semelhante a de um corpo humano e sua massa específica é de 1,7 g/cm³ (LUZ, 2014; BRAGA, 2015; NASCIMENTO, 2017). Cada amostra foi submetida a disparo individual e com o impacto da munição foi causada uma deformação na plastilina. Tal deformação tem que ser igual ou inferior a 44 mm para atender a NIJ 0101.04 (2000). As medições dessa deformação foram aferidas por meio de um sensor a laser digital modelo Q4X Banner (Figura 3.15.b), no qual obteve-se uma leitura de 10 regiões diferentes e posteriormente obtida uma média dessas indentações.

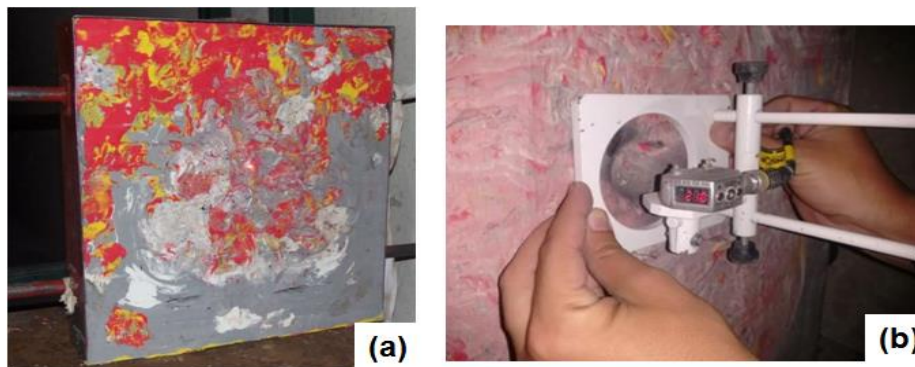


Figura 3.15 - (a) Plastilina (LUZ, 2014) (adaptado) e (b) sensor a laser.

De posse dos dados da indentação para cada amostra, realizou-se uma análise estatística para maior confiabilidade dos resultados.

3.3.5 Ensaio de impacto

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados no Laboratório de Ensaio Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC) na COPPE/UFRJ, com o equipamento Tinius Olsen modelo IT542, conforme a norma ASTM D6110. E os ensaios de impacto Izod foram realizados no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF, com o equipamento PANTEC modelo XC-50, conforme a norma ASTM D256.

Os compósitos foram preparados da mesma maneira que a supracitada no item 3.2.2 e posteriormente as placas de cada compósito foram cortadas com as dimensões e padrões das respectivas ASTMs, no laboratório de mecânica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Foram preparadas 9 amostras de cada teor para o ensaio de impacto Charpy e 15 amostras de cada teor para o ensaio de impacto Izod. As dimensões e exemplos dos corpos de provas utilizados nos dois ensaios estão ilustradas na Figura 3.16.

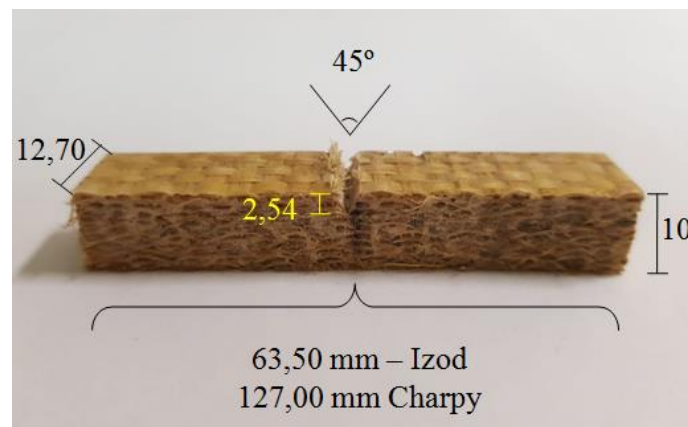


Figura 3.16 - Corpo de prova utilizado nos ensaios com as respectivas dimensões.

O entalhe dos compósitos foi feito utilizando-se uma brochadeira manual PANTEC, disponível no Laboratório de Ensaio Mecânicos do IME. A profundidade adotada para o entalhe foi de 2,54 mm e um ângulo de 45°, tais padrões regidos pela norma (Figura 3.16). O entalhe foi feito de forma que ficassem perpendiculares as camadas de tecido, para que assim pudesse ser analisada a energia de fratura em Joules por metro (J/m) do compósito com tecido de buriti.

3.3.6 Caracterização das Fibras, tecidos e dos compósitos

As fibras e os compósitos foram submetidos a ensaios de caracterização para qualificação química e térmica. A Tabela 3.7 apresenta, sucintamente, os ensaios realizados para cada amostra e o respectivo objetivo de realizar as análises.

Tabela 3.7 - Caracterização e análises aplicadas na fibra e nos compósitos de buriti.

Amostra Análise	TB	Compósitos			Objetivo de realizar a análise
		CETB10	CETB20	CETB30	
MEV	x				Morfologia da TB e mecanismo de falha
FTIR	x				Constituição química
DRX	x	x	x	x	Cristalinidade
TGA/DTG	x	x	x	x	Comportamento térmico
DSC	x	x	x	x	Comportamento térmico
DMA		x	x	x	Comportamento dinâmico mecânico em função da temperatura

*TB - Tecido de buriti

*CETBXX, compósito epoxídico reforçado com tecido de buriti nas frações em volume de XX%

Os detalhes da realização das análises, bem como os laboratórios e seus respectivos parâmetros utilizados, estão apresentados nos próximos tópicos.

3.3.6.1 Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido

O ensaio de determinação da densidade superficial do tecido de buriti foi realizado conforme a norma NBR 10.591:2008. Os tecidos foram cortados nas dimensões de 10 x 10 cm e a massa dos tecidos foram aferidas utilizando uma balança de precisão Mettler, modelo PM 460. Os cálculos da densidade superficial ou gramatura do tecido foram realizados por meio da seguinte equação:

$$D = \frac{m}{A} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

D: Densidade superficial do tecido (g/m²);

M: Massa total da amostra (g);

A: Área da amostra (m²).

3.3.6.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A fim de avaliar e identificar as vibrações e estiramentos das ligações efetivas das fibras de buriti foi realizada uma análise de espectroscopia de infravermelho. Uma amostra de KBr (300 mg) e cerca de 1,5 mg de amostra da fibra de buriti foi macerada em um almofariz e pistilo de ágata até ficarem em condições pulverulentas.

As pastilhas foram obtidas no pastilhador utilizando uma pressão de 10kgf·cm⁻² sob vácuo durante 5 min, em seguida foi efetuada a varredura numa faixa espectral de 4000 a 400 cm⁻¹ com 32 scans. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro de modelo IR Prestige 21-FTIR-Shimadzu (Figura 3.17), disponível no Departamento de Química do IME.



Figura 3.17 - Espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em um modelo IR PRESTIGE 21-FTIR-SHIMADZU.

3.3.6.3 Difração de raios X (DRX)

A análise de difração de raios x foi realizada na fibra de buriti para determinar o Índice de cristalinidade e comparar com outras estruturas de FNL já conhecidas. Além disso, foram submetidas ao ensaio as amostras de compósitos (CETB10, CETB20 e CETB30) para verificar se havia algum comportamento de cristalinidade nas amostras. O ensaio foi realizado em um difratômetro de Raios X da Bruker, modelo *D8 advanced*, disponível na Universidade Federal Fluminense (UFF). A fonte de radiação utilizada foi de $\text{CuK}\alpha$ com voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, varredura de 0,05 (2 θ /5s) para valores de 2 θ entre 10 e 70°.

De posse do resultado obtido no difratograma, foi possível calcular os índices de cristalinidade das fibras por meio da EQ. 3.2 definida pelo método empírico de Segal et al. (1959), que fornece um valor aproximado:

$$I_c = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad \text{Eq 3.2}$$

Onde: I_c corresponde ao índice de cristalinidade em porcentagem; I_{002} ao pico de intensidade de difração que representa o material cristalino perto de $2\theta = 22^\circ$ e, por fim, I_{am} corresponde ao pico de intensidade de difração que representa o material amorfo perto de $2\theta = 16^\circ$.

3.3.6.4 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Para a análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) das fibras e dos compósitos de 10, 20 e 30% de reforço com tecido de buriti foram realizadas fazendo a cominuição dos mesmos e colocadas em cadinho de alumínio. O equipamento utilizado nessa análise foi um da TA instruments, modelo Q1000, pertencente ao Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ) (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Equipamento de DSC da TA instruments, modelo Q1000.

Os padrões utilizados nesse ensaio foram atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10°C/min e um intervalo de temperatura de 20 a 200°C. O objetivo da análise foi determinar os possíveis picos endo e exotérmicos das amostras e verificar o comportamento da fibra e dos compósitos até 200°C.

3.3.6.5 Análise termogravimétrica (TG)

As análises termogravimétricas das fibras e dos compósitos foram realizadas conforme ASTM E1131 em um analisador termogravimétrico da TA instruments, modelo Q500, pertencente ao IMA (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Equipamento TA instruments modelo Q500.

As amostras, já cominuídas, foram colocadas em cadinhos de alumínio e submetidas a análise por termogravimetria (TG), sob fluxo de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10°C/min em um intervalo de temperatura de 10°C até 700°C. Foram determinadas a perda de massa, a temperatura de início da perda de massa (T_{onset}) e a temperatura de máxima taxa de perda de massa.

3.3.6.6 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

Para análise de DMA foram preparados corpos de prova retangulares de tecido com resina epóxi, medindo 50x13x5 mm (Figura 3.20). Todo o procedimento seguiu o previsto na norma ASTM D4065 e o modo de ensaio foi em um equipamento de DMA TA Instruments modelo operacional Q/800 pertencente ao Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ), em um modo de flexão de três pontos a 1 Hz de frequência e taxa de aquecimento de 3°C/min sob atmosfera de nitrogênio.



Figura 3.20 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de DMA.

As curvas de variação do módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e tangente delta ($\tan\delta$) relacionados com o comportamento viscoelástico do material, bem como parâmetros importantes como a temperatura de transição vítrea dos compósitos. O comportamento dos compósitos foram analisados nas temperaturas de -50 a 180°C.

3.3.7 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

As amostras foram submetidas ao MEV para analisar a morfologia da fibra de buriti utilizada nessa pesquisa e para verificar as regiões danificadas após o ensaio balístico. O modelo do MEV utilizado é Quanta FEG 250, da FEI (Figura 3.21), com diferentes aumentos. Este equipamento está equipado com um detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) que permitiu a caracterização qualitativa dos elementos químicos presentes nas amostras.



Figura 3.21 - Microscópio eletrônico de varredura, modelo Quanta FEG 250, da FEI.

As superfícies para serem analisadas no MEV precisaram passar pelo processo de recobrimento condutor de ouro ou platina. Tal processo foi realizado pelo equipamento de deposição de filme de alto vácuo da marca LEICA, modelo EM ACE600 (Figura 3.22.a), e a Figura 3.22.b ilustra as amostras recobertas com ouro.

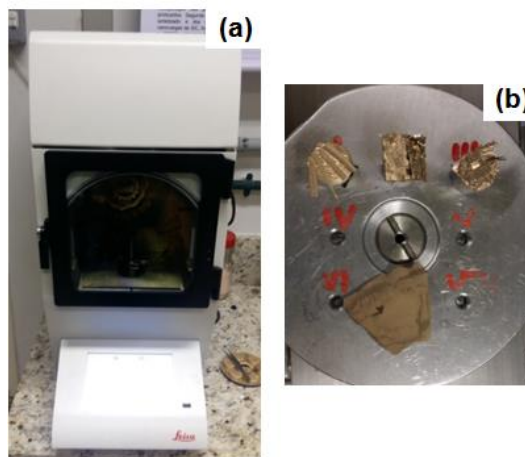


Figura 3.22 - (a) Sistema de deposição de alto vácuo, LEICA, modelo EM ACE600; (b) Detalhe de amostras após recobrimento de ouro.

3.3.8 Método estatístico (ANOVA)

Os dados obtidos nos ensaios foram submetidos à análise de variância (ANOVA), através do teste F, para verificar se existiam diferenças significativas entre as frações dos tecidos nos compósitos e para verificar se a presença do LiF influenciava no comportamento balístico. O nível de significância utilizado para todos os testes foi de 5%, ou seja, utilizou-se um parâmetro de 95% de confiança para os resultados. Os parâmetros estatísticos utilizados nessa análise estão apresentados na Tabela 3.8. Neste método, quando o valor de $F_{\text{calculado}}$ for superior ao valor tabelado, também chamado de $F_{\text{crítico}}$. Temos que a hipótese H_0 de que as médias dos resultados obtidos não são iguais.

Tabela 3.8 - Parâmetros estatísticos utilizados de acordo com à análise de variância (ANOVA)

Causas de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fcalculado	Fcrítico
	(GL)	(SQ)	(QM)		
Tratamento	(k -1)	SQTr	QMTr	QMTr/QMR	Tabelado
Resíduo	k (r-1)	SQR	QMR		
Total	kr -1	SQT			

Onde k é o número de tratamentos empregados; r é o número de repetições de cada tratamento; $n = k \cdot r$; e T é o total de cada tratamento. E para calcular as somas dos quadrados e os quadrados médios, utilizou-se as seguintes equações:

$$\text{Soma de Quadrado Total: } SQT = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{EQ. 3.3}$$

$$\text{Soma de Quadrado de Tratamentos: } SQTr = \frac{\sum r^2}{r} - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{EQ. 3.4}$$

$$\text{Soma de Quadrado de Resíduo: } SQR = SQT - SQTr \quad \text{EQ. 3.5}$$

$$\text{Quadrado Médio de Tratamento: } QMTr = \frac{SQTr}{k - 1} \quad \text{EQ. 3.6}$$

$$\text{Quadrado Médio de Resíduo: } QMR = \frac{SQR}{n - k} \quad \text{EQ. 3.7}$$

Foi utilizado o Teste de Tukey para os diversos tipos e frações volumétricas de tecido de buriti para verificar a existência de diferença significativa entre as médias dos resultados obtidos. O objetivo foi avaliar quantitativamente dois a dois cada um dos tipos ou percentuais de tecidos utilizados (tratamentos). Trata-se de um teste de hipóteses, no qual, a partir dos resultados obtidos rejeita-se ou não a hipótese de igualdade com base na diferença mínima significativa (d.m.s), dada pela Equação 3.8.

$$\text{d. m. s.} = q * \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad \text{EQ. 3.8}$$

Onde q é um valor tabelado e é função do grau de liberdade do resíduo e do tratamento. Com isso, pôde-se verificar comparativamente a influência dos tipos e percentuais de reforço de tecido de buriti, utilizados na matriz epoxídica, nas diversas amostras de ensaios balísticos e mecânicos, e concluir qualitativamente e quantitativamente, qual configuração possibilitou resultados mais expressivos nas propriedades medidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CAMADA PRIMÁRIA: CERÂMICA

4.1.1 Densificação dos corpos cerâmicos

A densificação dos corpos cerâmicos foi realizada nas amostras com 5mm de diâmetro e foram fabricadas 5 pastilhas cerâmicas para calcular a densidade e a densificação das amostras. Os resultados obtidos por meio do ensaio de Arquimedes para as cerâmicas dopadas com LiF e sem o composto estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.1. Os dados foram comparados com outros autores para verificar a coesão dos valores. Observa-se que os dados encontrados para as pastilhas cerâmicas estão sempre com valores bem aproximados com as referências.

Tabela 4.1 - Densidade e densificação das amostras cerâmicas.

Amostras	Al ₂ O ₃ + Nb ₂ O ₅		Al ₂ O ₃ + Nb ₂ O ₅ + LiF	
	Densidade (g/cm ³)	Densificação (%)	Densidade (g/cm ³)	Densificação (%)
1	3,392	84,10	3,351	89,97
2	3,409	83,09	3,352	91,32
3	3,357	84,61	3,351	92,53
4	3,361	85,17	3,361	91,02
5	3,348	83,48	3,358	90,89
PT*	3,373	84,09	3,354	91,14
LUZ, 2014	3,510	87,65	-	-
JESUS, 2014	3,567	89,07	3,715	93,08
BRAGA, 2015	3,330	82,73	-	-
SANTOS, 2016	3,675	91,75	3,757	93,98

PT* - Presente Trabalho

A adição do LiF apresenta um valor de 7% na densificação das pastilhas cerâmicas, ainda assim os dados foram tratados estatisticamente pela análise de variância para dizer com

confiança se eles são diferentes. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os dados tratados estatisticamente pela ANOVA para a densificação das amostras.

Tabela 4.2 - Análise estatística da densificação das pastilhas cerâmicas com e sem LiF.

Causas de variação	GL	SQ	QM	Fcalc	Fcrítico	dms
Tratamentos	1	124	124	160,11	5,32	1,16
Resíduo	8	6	1	-	-	
Total	9	131	-	-	-	

A partir dos resultados obtidos na análise de variância da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** rejeita-se a hipótese de que as médias das densificações sejam iguais, com 95% de confiança, uma vez que o $F_{calc} \gg F_{critico}$. Ou seja, como esperado, a presença do composto de Fluoreto de Lítio influencia na densificação das pastilhas cerâmicas. Por este motivo, aplicou-se o teste de Tukey para comparação de médias. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi de 1,16. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios das densificações entre as pastilhas cerâmicas com e sem fluoreto de lítio analisadas. Além disso, os valores maiores que d.m.s. são apresentados em negrito.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios da densificação das pastilhas cerâmicas com e sem o fluoreto de Lítio, após aplicação do teste de Tukey.

Cerâmicas	Sem LiF	Com LiF
Sem LiF	-	7,06
Com LiF	7,06	-

Com base nesses resultados, têm-se que, com nível de significância de 5%, que a presença do LiF, apresentou melhor densificação, pois exibiu maior valor de densificação média (91,14%), sendo significativamente diferente da pastilha sem LiF, pois as diferenças encontradas são superiores ao d.m.s (1,16).

A fim de analisar a morfologia das pastilhas cerâmicas sinterizadas e a característica de fratura do corpo cerâmico, foram realizadas análises de MEV, antes e após o ensaio balístico. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**¹ apresenta as micrografias obtidas para as pastilhas cerâmicas sinterizadas com e sem o LiF.

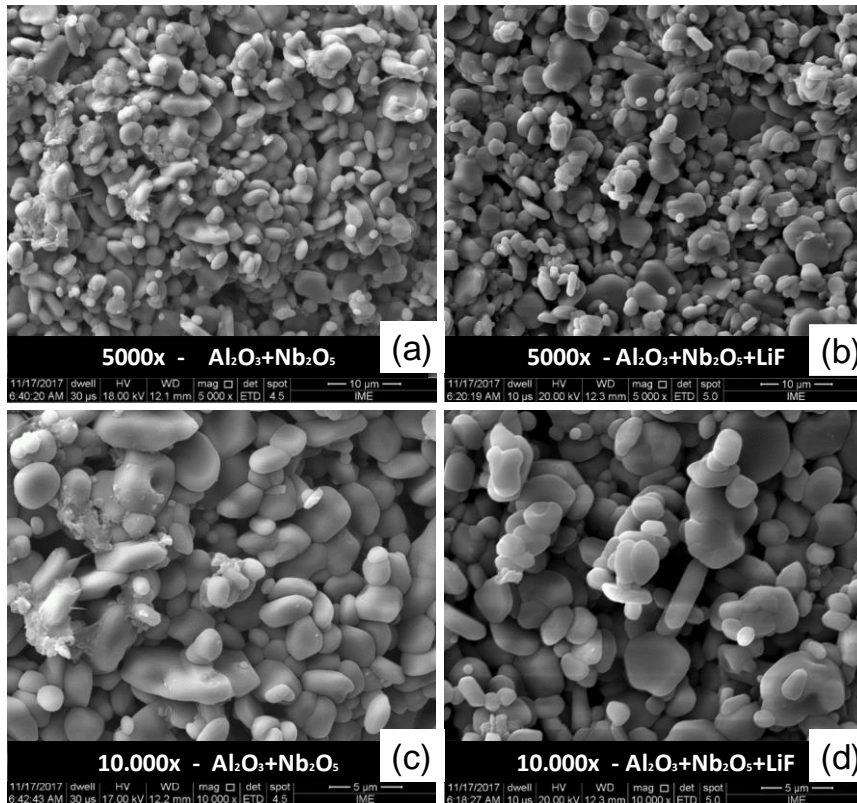


Figura 4.1- Micrografia das composições cerâmicas estudadas com um aumento de (a) 5.000X e (b) 10.000X.

De acordo com Jesus (2014) e SANTOS (2016), a presença do LiF diminui o tamanho dos grãos e produz uma morfologia mais arredondada. Em vista disso, foram medidos os tamanhos das partículas cerâmicas nas amostras com e sem LiF para afirmar se as pastilhas produzidas nessa pesquisa possuem a mesma característica. A **Erro! Fonte de referência não encontrada**.4.4 apresenta os valores obtidos para os tamanhos das partículas analisadas.

Tabela 4.4 - Tamanho das partículas cerâmicas com e sem LiF.

Amostra	Tamanho das partículas (μm)	
	Sem LiF	Com LiF
1	2822,12	4649,65
2	3073,46	3673,03
3	3225,65	5396,73
4	2219,18	3682,57
5	3096,67	4476,71
6	2711,74	5802,79
7	3711,82	2108,42
Média	2980,091	4255,700
Desvio Padrão	464,40	1236,82

Os dados foram tratados estatisticamente para afirmar, com 95% de confiança, se possuíam diferenças entre as amostras. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.5** apresenta os dados obtidos nas medições das partículas com os respectivos tratamentos da ANOVA.

Tabela 4.5 - Análise estatística das medidas dos TP das pastilhas cerâmicas com e sem LiF.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	dms
Tratamentos	1	5695120	5695120	6,53	4,67	1.038,63
Resíduo	12	10472260	872688			
Total	13	16167381				

Com base nos resultados obtidos na análise de variância, rejeita-se a hipótese de que as médias dos TPs sejam iguais com nível de significância de 5%, visto que $F_{calc} > F_{crítico}$. Isto é, as partículas cerâmicas produzidas com LiF alteram o tamanho da partícula. Por esse motivo aplicou-se o teste Tukey na comparação das médias. A d.m.s. encontrada foi de 1038,63 mm. Os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios dos TP foram de 1.275,61 mm entre as pastilhas cerâmicas com e sem fluoreto de lítio, portanto conclui-se que há diferença nos TP das amostras.

As amostras foram submetidas ao ensaio balístico e, após o ensaio, foram realizadas análises de MEV nas pastilhas cerâmicas para caracterizar a superfície de fratura nas pastilhas. A Figura 4.2 apresenta, pelas setas em vermelho, a superfície de fratura após o ensaio balístico destacando a característica de fratura intergranular.

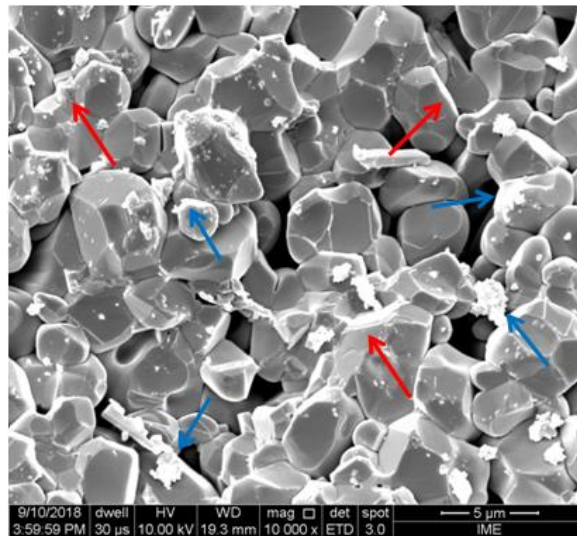


Figura 4.2 - Micrografia da amostra cerâmica sem LiF após o ensaio balístico, com um aumento de 10000x.

Ainda de acordo com a Figura 4.2 é possível identificar, pelas setas azuis, que os contornos dos grãos possuem uma coloração esbranquiçada, tal característica ocorre por causa do Alumínio, Nióbio e Oxigênio que tendem a formar um composto de AlNbO_4 gerando assim uma 2ª fase no contorno do grão (RANDALL, 1996; GOMES, 2004; TRINDADE, 2012). Ademais, as cerâmicas produzidas com o LiF mostram que o flúor tem uma preferência em localizar-se junto com o nióbio (SANTOS, 2017). Em vista disso, a presente pesquisa realizou a análise de EDS nas pastilhas cerâmicas para verificar se o comportamento seria semelhante. O resultado obtido na EDS está apresentado na Figura 4.33.

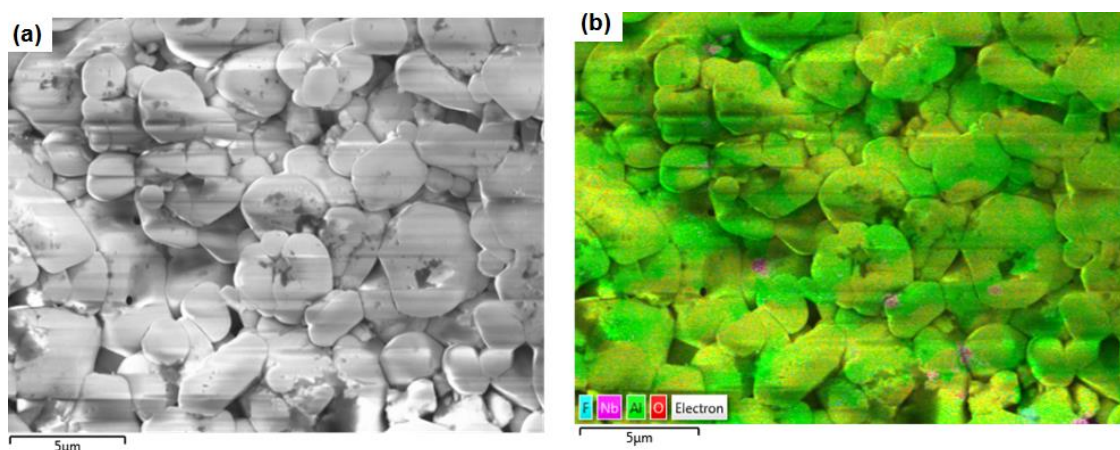


Figura 4.3 - Análise da presença do LiF nas pastilhas cerâmicas por meio do EDS.

De acordo com o resultado obtido na Figura 4.3, observa-se que a análise de EDS corrobora com o que Santos (2016) encontrou, onde o Flúor tende realmente a ficar nas regiões em que tem a presença do nióbio e sua localização preferencialmente é nos contornos das partículas cerâmicas.

4.2 CAMADA SECUNDÁRIA: COMPÓSITO

4.2.1 Caracterização dos tecidos e compósitos

Este primeiro tópico apresenta os resultados obtidos para a caracterização preliminar das fibras, tecido e dos compósitos. E nos próximos tópicos serão apresentados os resultados do ensaio que possui o objetivo principal dessa pesquisa, a avaliação do desempenho balístico.

4.2.1.1 Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido

A gramatura do tecido foi obtida por meio da Eq 3.1 e os dados obtidos estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, bem como a massa (g) e as áreas superficiais (m²).

Tabela 4.6 - Densidade superficial do tecido de Buriti.

Amostra	Massa (g)	Área (m ²)	Gramatura (g/m ²)	Gramatura média (g/m ²)
1	2,283	0,010	228,3	
2	2,436	0,010	243,6	229,6 ± 10,93892
3	2,169	0,010	216,9	

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**5 apresenta uma sequência de micrografias das superfícies, região interna e da trama do tecido de buriti. As imagens permitem observar as imperfeições e rugosidades das FNL, como citada anteriormente por outros autores (MONTEIRO et al, 2011; KALIA *et al*, 2011; LUZ, 2015). A superfície da

fibra de buriti apresenta uma característica mais lisa quando comparada com a região interna da fibra, isso é possível observar pela fibra fraturada que mostra o detalhe das duas regiões citadas. Ainda de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4.c, mostra em magnificação de 50x a trama do tecido de buriti, onde os fios das fibras são entremeados de forma ortogonal e alternados por baixo e por cima caracterizando a trama simples.

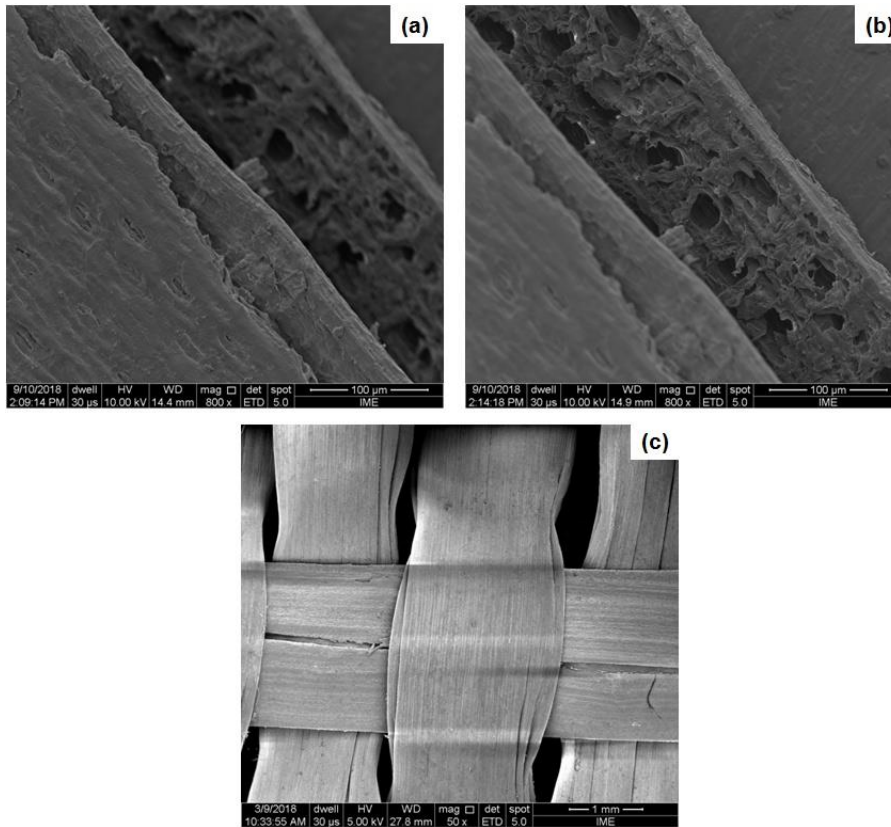


Figura 4.4 - Micrografia com as rugosidades e imperfeições da fibra de Buriti (a) superficial, com um aumento de 800x; (b) interna da fibra, com um aumento de 800x e (c) trama simples do tecido de buriti com aumento 50x.

A fim de implementar uma análise semi-quantitativa dessas amostras, realizou-se a análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para verificar os possíveis elementos químicos da fibra de buriti (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**a).

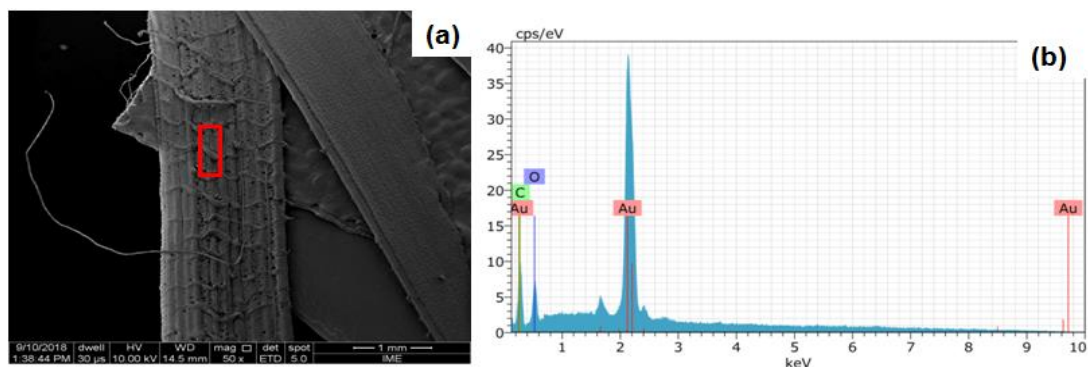


Figura 4.5 - Micrografia da fibra de buriti indicando o ponto analisado pela EDS.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada..**b, apresenta os picos obtidos com os respectivos elementos químicos, Ouro, Carbono e Oxigênio. O Ouro (Au) é referente ao recobrimento utilizado nas amostras para tornar a superfície condutora e por fim melhorar o sinal no MEV. E quanto ao Carbono (C) e o Oxigênio (O) são composições obtidas nas amostras de FNL. A fim de melhorar a visualização desses valores obtidos na EDS, criou-se a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 4.7 - Composição dos elementos na fibra de Buriti obtidos pela EDS.

Elementos	Composição (%)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Au	45,91	53,74	47,12
C	38,38	29,89	35,23
O	15,71	16,55	17,65

4.2.1.2 Densidade do compósito

A densidade do compósito foi calculada por meio do cálculo geométrico das placas produzidas e a densidade das fibras foi calculada por meio da regra das misturas (EQ. 1.3). Para o cálculo da densidade geométrica dos compósitos foram escolhidas aleatoriamente 6 placas de cada teor e aferiu-se as medidas das espessuras, larguras, comprimentos e as respectivas massas de cada placa. E para o cálculo pela regra das misturas utilizou-se as densidades de cada composto da fase e sua respectiva fração na composição. Portanto, considerou-se a densidade do epóxi de 1,11 g/cm³ (SILVA, 2014) e a densidade do tecido de

buriti é 0,911 g/cm³ (BARBOSA, 2011) e aplicou-se nas frações de reforço 10%, 20% e 30% em volume conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 4.8 - Densidade dos compósitos por meio da regra das misturas e pela densidade geométrica.

Amostras	Densidade geométrica	Densidade pela regra das misturas
Compósito de 10%	0,99 ± 0,20	1,096
Compósito de 20%	0,97 ± 0,16	1,082
Compósito de 30%	0,96 ± 0,14	1,068

Pode-se observar que tanto os valores de espessura quanto de densidade dos compósitos produzidos são estatisticamente iguais, com isso é possível acreditar que esses resultados não terão influência nos ensaios balísticos, ou seja, os compósitos produzidos poderão ter seus desempenhos balísticos comparados. (não tem como afirmar)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma região de contato entre a fibra e a matriz, no qual evidencia a interface de contato entre a fibra e a matriz, mostrando assim a dificuldade de adesão entre as duas devido à característica hidrofílica da fibra e a característica hidrofóbica da matriz.

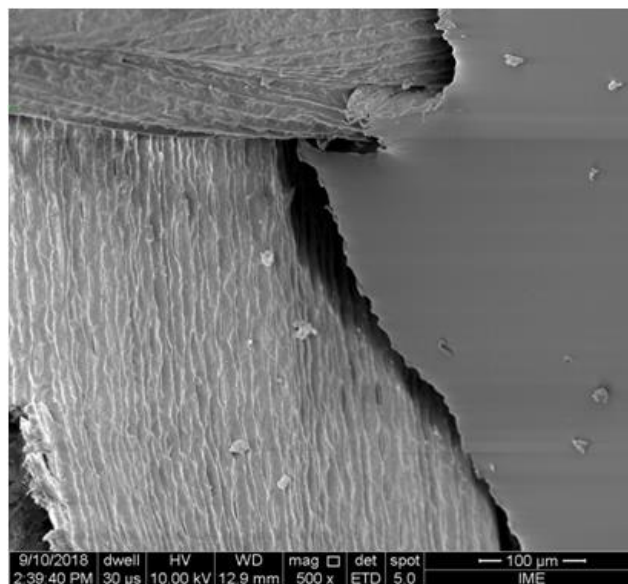


Figura 4.6 - Micrografia da interface da fibra com a matriz de resina epóxi no aumento de 500x.

4.2.1.3 FTIR

O espectro obtido no ensaio fornece uma assinatura característica para uma FNLs em termos de atividade de grupos funcionais. Com isso buscou-se na literatura as bandas de absorção característica a fibra de Buriti e os resultados são muito similares aos valores encontrados no presente trabalho. Alguns destaques das fibras analisadas é que Cattani (2016) realizou a análise da fibra de buriti extraída da borra e do linho. Enquanto que Lavoratti e colaboradores (2017) realizaram o ensaio da fibra de buriti em diferentes condições; como recebida; lavadas em água; e tratadas com diferentes teores de soluções de hidróxido de sódio. Desse modo, nota-se que os autores encontraram bandas de absorção muito semelhantes quando comparadas umas com as outras. Relembrando que o tecido utilizado nesse trabalho é confeccionado das fibras extraídas do linho.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o espectro obtido nessa pesquisa por de FTIR e observa-se que as principais bandas são características da fibra de buriti, pois são similares a de outros autores (ALBUQUERQUE *et al*, 2003; SANTOS, 2010; BRAMBILLA *et al*, 2012; POLETTTO *et al*, 2014 CATTANI, 2016). A frequência vibracional de $3447,40\text{ cm}^{-1}$ referente ao grupo OH, podendo ser ligação química da fibra ou umidade, $2918,01\text{-}2849,66\text{ cm}^{-1}$ referente ao estiramento das ligações C-H dos grupos CH e CH₂ da celulose e hemicelulose, $1735,86\text{ cm}^{-1}$ referente a estiramento da ligação C=O do ácido carboxílico da lignina ou do grupo éster da hemicelulose, $1460,13\text{ cm}^{-1}$ referente a lignina e estiramento da ligação simétrica CH₂ do anel pirano, $1262,42 - 1165 - 1039$ referente à ligação C-O e C – C (QIN *et al*, 2010; BRAMBILLA *et al*, 2012; BEVITORI *et al*, 2014; SILVA *et al*, 2016; LAVORATTI *et al*, 2017).

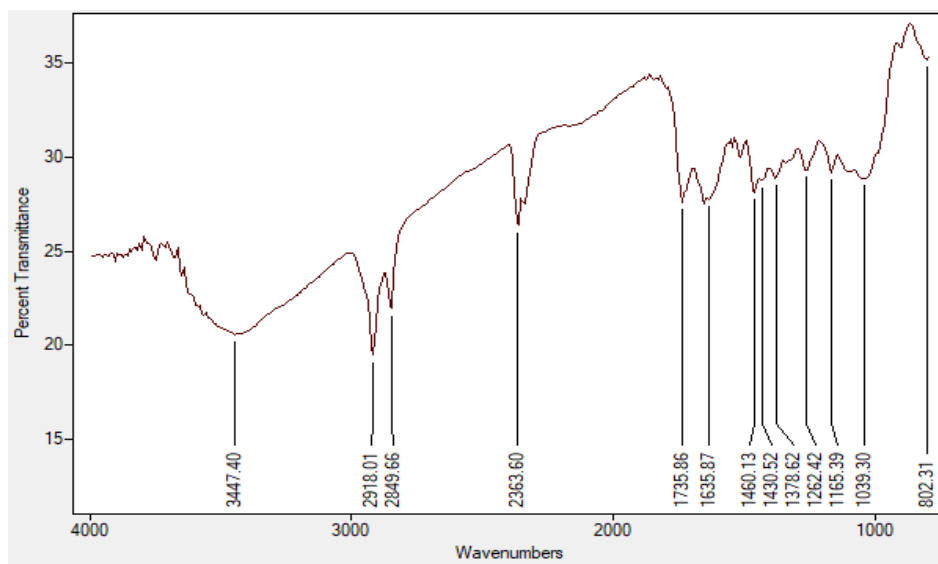


Figura 4.7 - Espectro obtido na fibra de buriti inserir o cm^{-1} .

4.2.1.4 DRX

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o difratograma obtido para a fibra de buriti, no qual é possível verificar dois picos bem intensos. O primeiro pico (I_{am}) representa a fase amorfa e o segundo pico (I_{002}) representa a fase cristalina, tais picos estão aproximadamente a $2\theta=16^\circ$ e a $2\theta=22^\circ$ respectivamente.

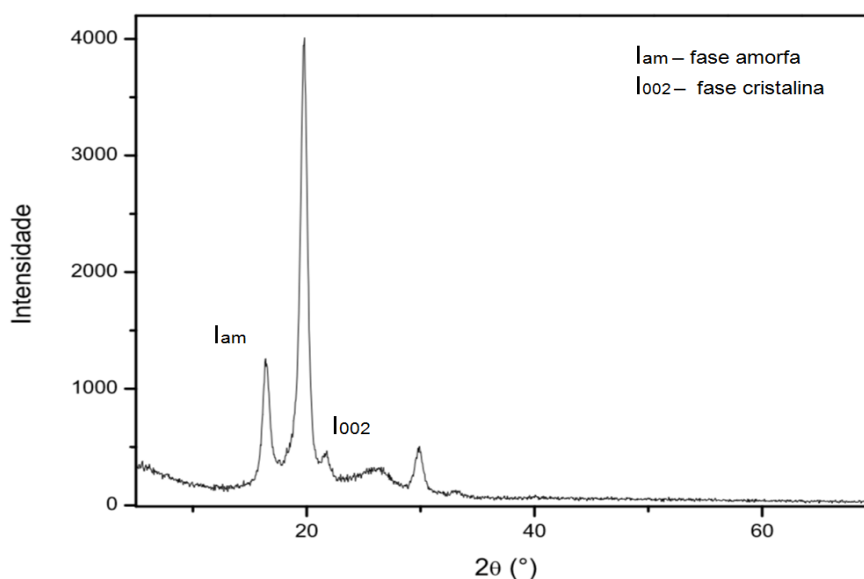


Figura 4.8 - Difratograma obtido para a fibra de buriti.

A intensidade dos picos foi de 1190 cps para a fase amorfa e 439 cps para a fase cristalina, dessa forma o I_c da fibra de buriti foi de 63,11%. Esses valores corroboram com os valores citados na literatura sobre o teor de celulose da fibra de buriti ser de aproximadamente 65% (POLETTO et al 2014; JUNIOR et al, 2016). E comparando o teor de celulose encontrado, para fibra de buriti, com outras FNL têm-se que a fibra de sisal, juta e cânhamo também possuem valores próximos de 65% (FARUK et al, 2012). Os resultados obtidos para a análise de DRX para os compósitos estão apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4.9.

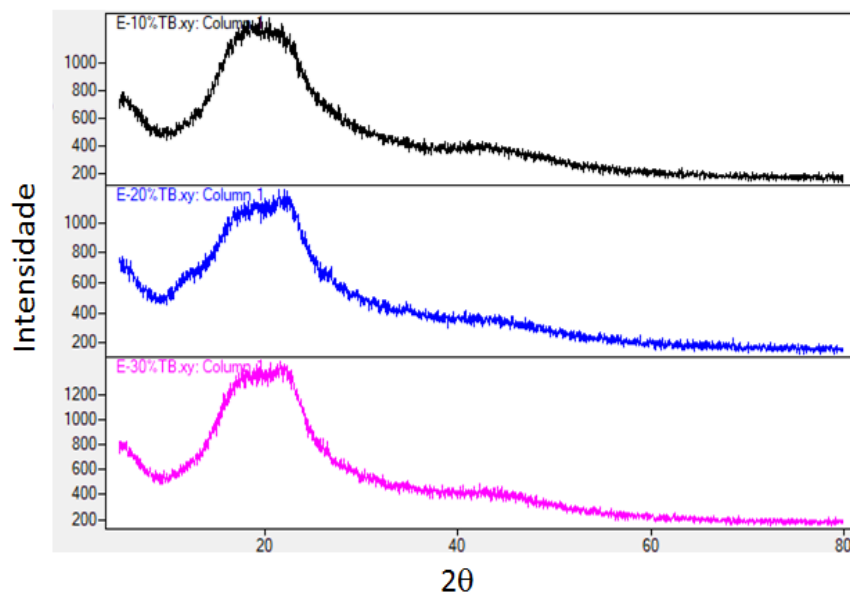


Figura 4.9 - Difratoograma obtido para os compósitos reforçados com tecido de buriti.

As amostras dos compósitos foram submetidas ao ensaio de DRX e, como apresenta na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ao longo do difratograma verifica-se um comportamento predominantemente amorfo, pois para todos os compósitos a presença do halo amorfo na região de, aproximadamente, $2\theta=16^\circ$ e um possível pico de cristalinidade na região de $2\theta=22^\circ$.

4.2.1.5 TG

Os resultados obtidos na análise termogravimétrica (TG) para as fibras e os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% estão apresentados nas **Erro! Fonte de**

referência não encontrada.4.10 a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**12. As figuras também apresentam a derivada de primeira ordem da termogravimetria (DTG) das condições supracitadas. A presente pesquisa definiu três estágios para fazer a análise da degradação da fibra, o primeiro estágio corresponde com o intervalo de 23°C a 200°C, o segundo estágio varia de 200°C a 500°C e o terceiro estágio com o intervalo de 500°C a 700°C. Entretanto, em especial para curva da fibra de buriti, os estágios foram de 0 a 200°C, 200 a 400°C e de 400 até 700°C. Foram escolhidos esses valores por causa da literatura que geralmente realiza a análise do segundo estágio até 400°C. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a curva de TG e DTG da fibra de buriti.

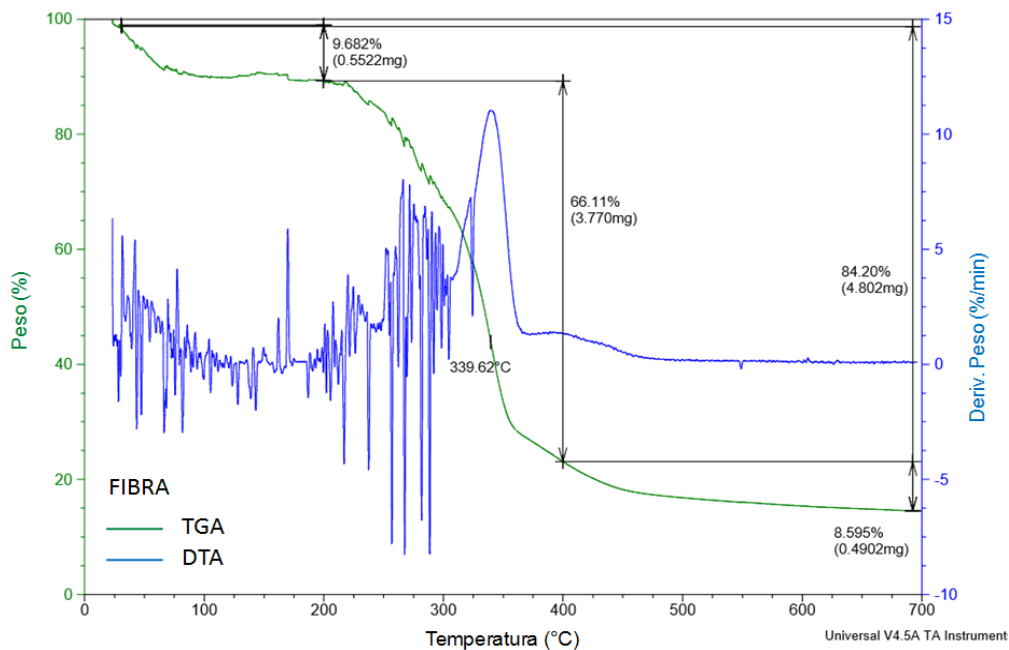


Figura 4.10 - Curvas de TG/DTG para a fibra de Buriti.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma perda de massa de aproximadamente 10% o que corresponde a 0,55 mg e isso é decorrente da perda de umidade. O segundo estágio apresenta a maior perda de massa de toda curva e isso é associada provavelmente a processos como a quebra de grupos hidroxila, desidratação e despolimerização da celulose (MARTIN et al., 2009). A partir de 340°C ocorre a perda dos componentes estruturais da fibra, como celulose, hemicelulose e lignina (SANTOS et al, 2010; MONTEIRO et al. 2012; LAVORATTI et al, 2016). E o terceiro estágio apresenta uma degradação comparável com a primeira, no quesito de porcentagem, no qual a fibra perdeu em torno de 9% de massa. Os resultados encontrados por Barbosa (2014) possuem um comportamento térmico muito similar ao apresentado aqui, nos quais as perdas de massa são

7,134%, 76,465% e 15,079% nos três estágios. Santos e colaboradores encontraram valores bem próximos aos apresentados nessa pesquisa, que são de 8%, 74% e 6%.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as TGs dos compósitos e, com o intuito de facilitar o entendimento dos valores obtidos pelas curvas, os dados para a perda de massa e a temperatura máxima de degradação foram inseridos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

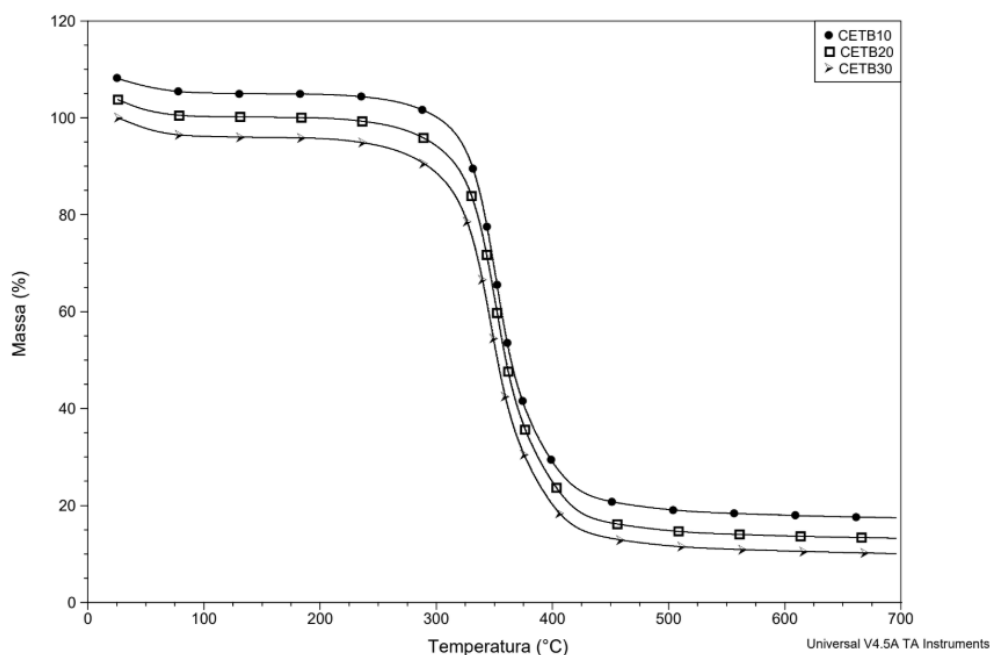


Figura 4.11- Curva de TG dos compósitos reforçados com tecido de buriti.

Tabela 4.9 - Perdas de massa e temperatura máxima de degradação dos compósitos reforçados com tecido de buriti.

Amostra	Perda de Massa (%)				Tonset	T _{máx}
	Estágio I	Estágio II	Estágio III	Total		
CETB10	3,330	85,67	1,714	90,71	325,90	351.67
CETB20	3,801	85,13	1,590	90,52	324,38	351.52
CETB30	4,272	84,03	1,667	89,97	319,39	347.49

As curvas de TG dos compósitos apresentaram resultados muito próximos uns dos outros. Em todas as três condições analisadas os intervalos apresentaram valores próximos,

isto é, o primeiro estágio as perdas de massa foram aproximadamente 3% de perda de massa, o segundo em torno de 85% e o terceiro estágio em torno de 1%.

Realizando uma comparação com a perda de massa da fibra, têm-se que o primeiro estágio a fibra degradou mais que o compósito, mostrando assim que o compósito possui uma resistência térmica inicial bem controlada quando comparada com a fibra. Entretanto, no segundo e no terceiro estágio o compósito perdeu mais massa que a fibra, confirmando a característica que a matriz polimérica possui baixa resistência a temperaturas acima de 200°C (NABI SAHED e JOG, 1999; CALLISTER e RETHWISCH, 2018). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o resultado da curva de DTG dos compósitos.

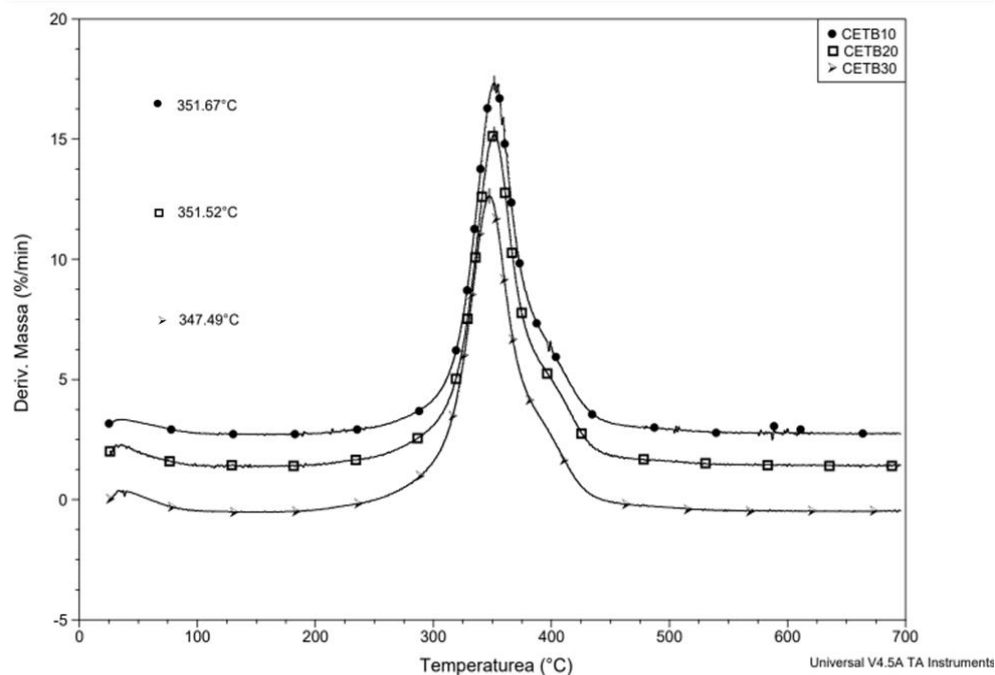


Figura 4.12 - DTG dos compósitos reforçados com tecido de buriti.

Para a análise da curva da DTG dos compósitos é observar que os picos de perda de massa das amostras ficaram muito próximos, apresentando valores de 351,67°C; 351,52°C; 347,49°C. Portanto, os picos associados à decomposição da resina epóxi, aparentemente são afetados pela presença do reforço de tecido de buriti e com isso ocorreu à estabilidade do compósito em relação aos materiais epoxídicos reforçados com tecido de buriti. A temperatura máxima de trabalho para o compósito considerada foi 200°C.

4.2.1.6 DSC

Com base nos dados obtidos na análise de TG, delimitou-se a temperatura de trabalho para 200°C. Portanto a análise de DSC foi realizada até 200°C nas amostras de fibra de buriti e nos compósitos, para verificar o possível pico endotérmico. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a curva de DSC obtida para a fibra de buriti.

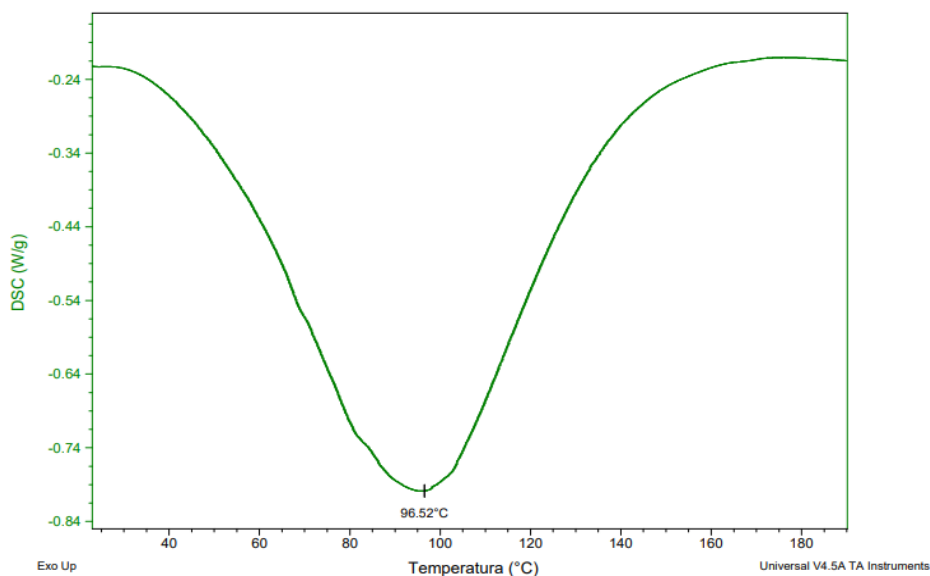


Figura 4.13 - Curva obtida no ensaio de DSC para o tecido de buriti.

Ainda de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível verificar a existência de um pico endotérmico à aproximadamente 96,52 °C. Esse pico pode ser associado à liberação de água de formação da FNL e à quebra de ligações inter e intramoleculares (Carashi et al, 2000; MONTEIRO et al, 2012). Os resultados obtidos, no DSC, para os compósitos estão apresentados simultaneamente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e os picos endotérmicos com suas respectivas temperaturas máximas estão destacados.

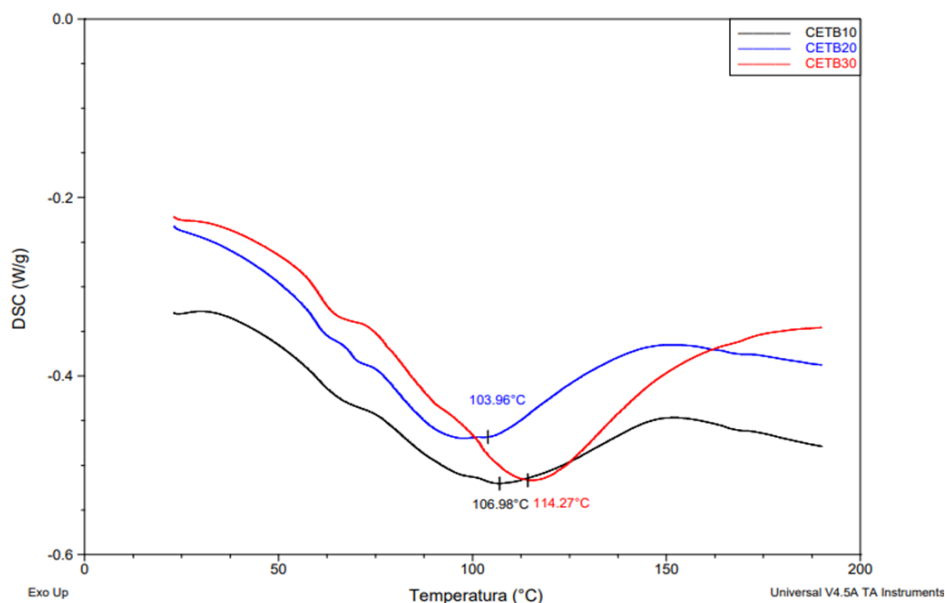


Figura 4.14 - Curva obtida no ensaio de DSC para os compósitos reforçados com tecido de buriti.

O resultado obtido na análise de DSC para os CETB10, CETB20 e CETB30 não apresentou nenhum pico evidente de temperatura de fusão cristalina o que corrobora com o resultado obtido na análise de DRX, onde verifica-se que o material possui o comportamento predominantemente amorfo.

4.2.1.7 DMA

Foram realizadas análises dinâmico-mecânicas nos compósitos com 10%, 20% e 30% de tecido de buriti. Em cada uma das composições analisou-se as curvas do módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$. A sequência de **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, mostram os resultados obtidos para cada percentual de fibras supracitado.

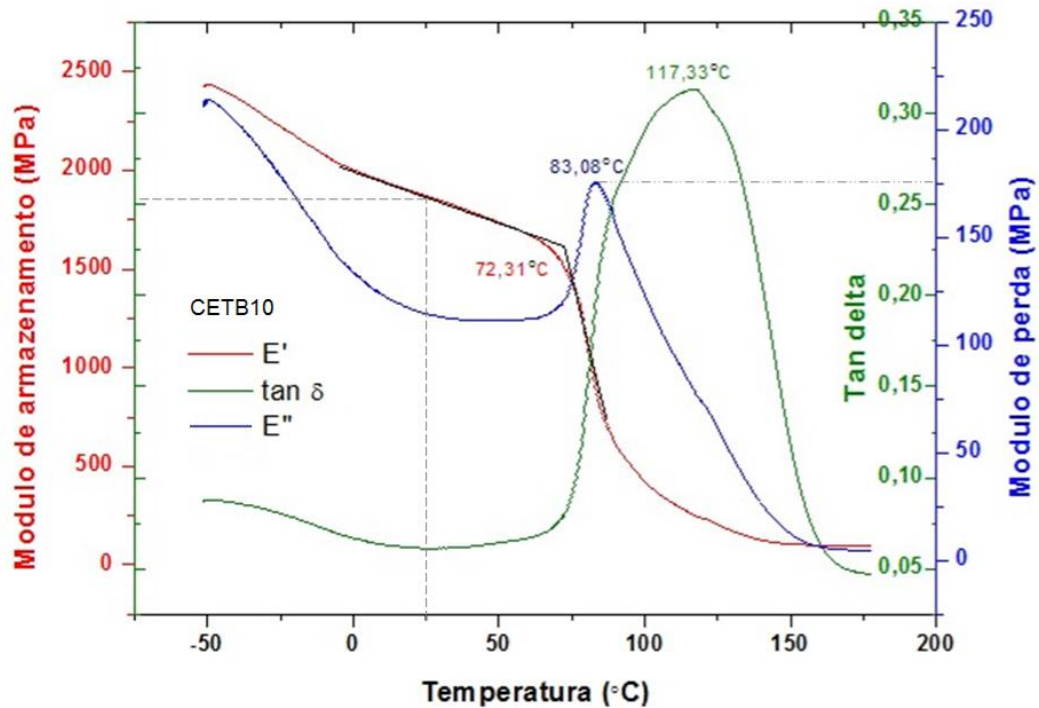


Figura 4.15 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e tan δ para compósito epoxídico reforçado com 10% de tecido de Buriti.

A partir dos resultados obtidos nesta análise, o compósito com 10% de tecido de buriti apresenta uma Tg de aproximadamente 72,31°C por E', 83,08°C pelo pico E'' e 117,33°C pelo pico tan δ . O módulo de armazenamento alcançou cerca de 1800 MPa a temperatura de 25°C e o módulo de perda em torno de 175 MPa no seu ponto máximo.

A determinação da temperatura de transição vítrea (Tg) foi realizada adotando-se o método da ASTM E1640 que leva em consideração o maior pico do gráfico. Assim, a Tg do CETB10 é de 117,83°C, no qual esta representada pelo pico da tan δ . Apesar da literatura não apresentar um consenso sobre qual variável deva ser empregada, considera-se que a tan δ é uma razão entre o E' (módulo viscoso) e E'' (módulo elástico).

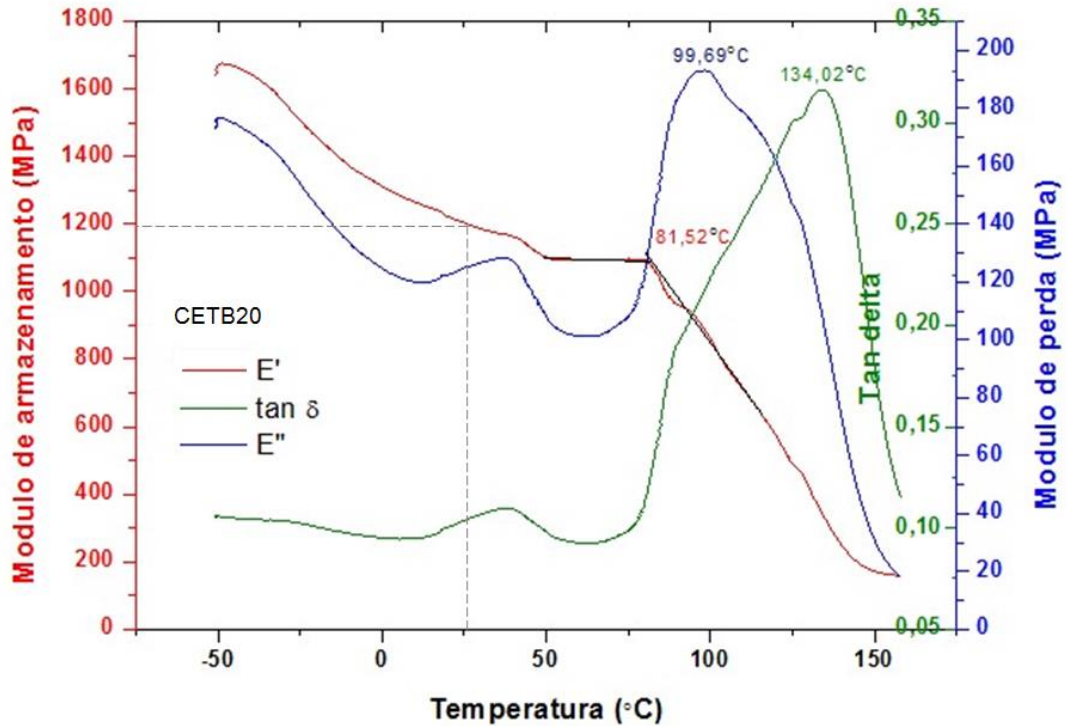


Figura 4.16 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e tan δ para compósito epoxídico reforçado com 20% de tecido de Buriti.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** permite observar os dados característicos da amostra CETB20, nos quais apresentou uma Tg de aproximadamente 81,52°C por E', 99,69°C pelo pico E'' e 134,02°C pelo pico tan δ . Para a temperatura de 25°C obteve um módulo de armazenamento aproximadamente 1200 MPa e o módulo de perda em torno de 190 MPa no seu ponto máximo.

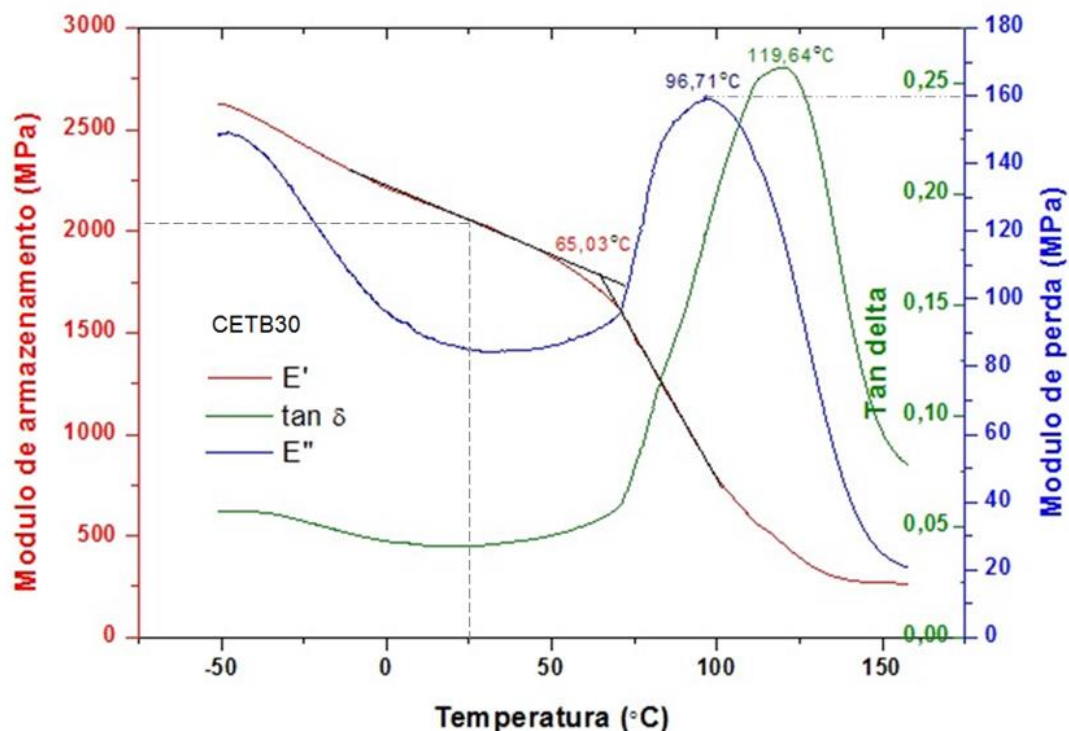


Figura 4.17 - Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ para compósito epoxídico reforçado com 30% de tecido de Buriti.

A amostra do CETB30 apresenta uma T_g de aproximadamente $65,03^\circ\text{C}$ por E' , $96,71^\circ\text{C}$ pelo pico E'' e $119,64^\circ\text{C}$ pelo pico $\tan \delta$. O módulo de armazenamento alcançou cerca de 2050 MPa a temperatura de 25°C e o módulo de perda em torno de 160 MPa no seu ponto máximo. O pico de relaxação (α), representado pelo ponto máximo da curva do módulo de perda, variou entre 50°C e 80°C para todas as amostras. Nesta composição o máximo de dissipação de calor por unidade de deformação é obtido, visto que esta possui a temperatura em que E'' é máximo. Os dados obtidos para os três compósitos analisados estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Dados obtidos no ensaio de DMA dos compósitos reforçados com tecido de buriti.

Amostra	E' (MPa)	E'' (MPa)	T_g ($^\circ\text{C}$)
CETB10	1750	175	117.33
CETB20	1200	190	134.02
CETB30	2050	160	119.64

Realizando uma análise para os valores do E', a amostra com CETB30 teve quase 20% a mais na resistência do que o CETB10. Além disso, como era esperado, o módulo de perda do CETB30 teve um valor significativamente menor que o CETB10 isso é devido a maior quantidade de fibras inseridas no compósito.

A fim de realizar uma comparação com os dados da literatura sobre o ensaio de DMA, a Tabela 4.11 apresenta dados de compósitos poliméricos reforçados com 30% em volume de FNL em configurações de tecido e fibra.

Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos por DMA para compósitos poliméricos reforçados com 30% em volume de FNL em configurações de tecido e fibra.

Amostra	Configuração	Parâmetros obtidos no ensaio de DMA			Referência
		E' (MPa)	E'' (MPa)	Tan δ (°C)	
Buriti/Epóxi	Tecido	2050	160	119,64	PT*
Fique/Poliéster	Tecido	1400	200	73,84	MONTEIRO et al, 2018.
Malva/Epóxi	Fibra	4300	600	96,91	NASCIMENTO et al, 2017.
Palf/ Epóxi	Fibra	12000	16000	120	LUZ et al, 2017
Coco/ Epóxi	Fibra	3100	2100	75	LUZ et al, 2017
Bucha/ Poliéster	Fibra	2500	250	65	CANDIDO et al, 2016

PT - Presente trabalho

O compósito reforçado com tecido de buriti apresentou valor superior do E', quando comparado com o compósito reforçado com tecido de fique. Além disso, o valor foi relativamente próximo ao encontrado pelo compósito reforçado com fibra de bucha. Entretanto, quando realiza a comparação entre o resultado obtido pelo tecido de buriti para o compósito reforçado com a fibra de palf ou de malva, os valores ficaram maiores que o dobro do obtido pelo tecido. Uma possível justificativa para o caso é que as FNL apresentam diferenças de resistência devido o local de plantação, cultivo, extração e outros (SATYARANAYNA et al, 2007).

4.2.2 Ensaio de Impacto

4.2.2.1 Ensaio de Impacto Charpy

Os resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy para os compósitos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti, demonstraram existir uma boa capacidade de absorção de energia destes materiais comparativamente a outros compósitos reforçados com FNLs (MONTEIRO et al, 2008; MONTEIRO et al, 2009; MARGEM, 2013; CANDIDO, 2014; BARBOSA *et al.*, 2014; PEREIRA A. *et al.*, 2017a; PEREIRA A. *et al.*, 2018a NASCIMENTO et al, 2018;). As fraturas típicas dos corpos de prova ensaiados estão apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, em todos os corpos ensaiados ocorreu a ruptura completa dos mesmos, tornando válidos os resultados obtidos.



Figura 4.18 - Característica macro das fraturas das amostras ensaiadas no Impacto Charpy para os compósitos epoxídicos reforçados com tecido de buriti em 10, 20 e 30%.

Foram ensaiadas 9 amostras de cada teor de reforço e as energias absorvidas pelos compósitos no ensaio de impacto Charpy estão apresentados na Tabela 4.12, bem como a respectiva média e desvio padrão.

Tabela 4.12 - Resultados das energias absorvidas (J/m) no ensaio de impacto Charpy para os compósitos reforçados com tecido de buriti.

Amostras	CETB10 (J/m)	CETB20 (J/m)	CETB30 (J/m)
1	59,26	150,53	305,15
2	59,26	161,76	295,25
3	58,57	144,48	289,74
4	56,36	140,20	342,37
5	59,86	146,92	310,01
6	58,46	157,89	267,84
7	65,45	145,68	316,58
8	53,61	157,30	272,69
9	54,53	140,06	349,94
Média	58,57	149,42	305,51
Desvio Padrão	3,45	7,94	28,12

Pelos resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.12 percebe-se há dois grandes saltos na energia de impacto Izod. O primeiro do CETB10 para o CETB20, no qual a energia absorvida foi de 60% maior, e o segundo, do CETB20 para o CETB30 foi quase o dobro de absorção de energia. A explicação para esta mudança está associada a propagação transversal da trinca no CETB10, ou seja, a medida que aumenta-se a fração volumétrica de fibras, as mesmas passam a funcionar como barreiras que desviam a trajetória das trincas, e por conseguinte, aumentam a energia de impacto do sistema (GOMES, 2015).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o gráfico que relaciona a energia de impacto Charpy com o percentual de tecido de buriti. Nota-se que a energia de impacto absorvida é proporcional ao teor de reforço, ou seja, a energia de impacto aumenta conforme a fração do tecido aumenta. Este mesmo caso ocorreu para os outros trabalhos da literatura (MARGEM, 2013; PEREIRA, 2017; NASCIMENTO, 2017). Em uma análise preliminar dos resultados apresentados na Tabela 4.12 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível observar que o teor de reforço influencia na absorção de energia, entretanto a confirmação foi realizada por meio da análise de variância.

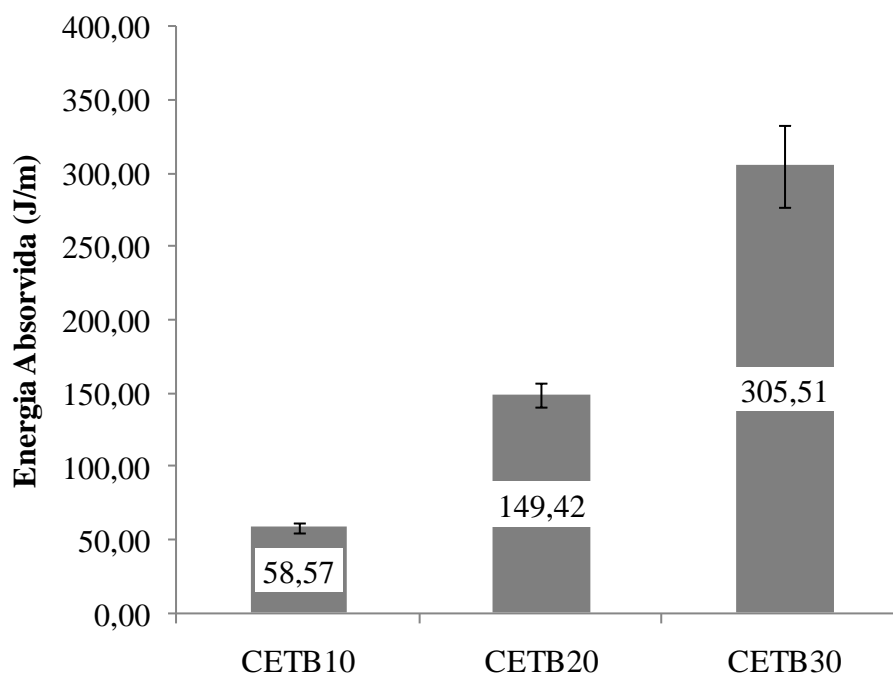


Figura 4.19 - Energia de impacto Charpy versus percentuais dos compósitos analisados.

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada para confirmar a diferença significativa entre os resultados obtidos para a energia de impacto Charpy entre os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti esta apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Análise de variância da energia de impacto Charpy para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	dms
Tratamentos	2	281179	140589	487,15	3,40	
Resíduo	24	6926	289			16,66
Total	26	288105				

Realizando a comparação dos valores obtidos para F_{calc} e para $F_{crítico}$, rejeita-se com 95% de confiança a hipótese de que as médias dos tratamentos são iguais, uma vez que o F_{calc} é muito maior que o $F_{crítico}$. Isto é, confirma-se que o teor de reforço utilizado influencia na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. Ainda baseado na análise de variância, é possível fazer a comparação das médias individuais pelo teste de Tukey. A diferença média significativa (dms) encontrada foi 16,66 J/m. A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios da energia de impacto Charpy entre as frações volumétricas de tecido de buriti testadas. Os valores das diferenças de energia são dados em J/m. Além disso, os valores maiores que d.m.s. são apresentados em negrito.

Tabela 4.14 - Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Charpy pelo teste de Tukey.

Amostras	CETB10	CETB20	CETB30
CETB10	-	91,05	247,13
CETB20	91,05	-	156,08
CETB30	247,13	156,08	-

De acordo com os resultados da Tabela 4.14, têm-se que todas as amostras obtiveram valores maiores que o dms. Portanto, pode-se afirmar, com nível de significância de 5% o teor de reforço influencia na absorção de energia. Além disso, o compósito reforçado com 30% de tecido de buriti apresentou melhor desempenho, pois exibiu maior valor de energia média de impacto Charpy (305,15 J/m).

Com o intuito de realizar uma comparação entre, o valor obtido para o ensaio de impacto Charpy, CETB30 e outros compósitos reforçados com o mesmo teor de FNLs, apresentam-se a Tabela 4.15. O objetivo era realizar uma análise da diferença de absorção de energia para as diferentes configurações dos compósitos.

Tabela 4.15 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy para os compósitos de 30% de reforço e comparação com os outros autores.

Material	Reforço (%)	Orientação	Média (J/m)	Referência
Buriti/Epóxi	30	Tecido	305,15	*PT
Buriti/Epóxi	30	Fibra	121,00	BARBOSA et al, 2011
Curauá/Epóxi	30	Fibra	103,20	MONTEIRO et al, 2007
Rami/Epóxi	30	Fibra	211,70	MONTEIRO et al, 2009
Juta/Epóxi	30	Fibra	214,00	PEREIRA et al, 2017.a
Fique/Poliéster	30	Tecido	293,11	PEREIRA et al, 2017.b
Malva/Epóxi	30	Fibra	905,49	NASCIMENTO et al, 2018

*PT - Presente Trabalho

Realizando uma análise dos valores obtidos para o compósito epoxídico reforçado com buriti em diferentes configurações: fibra alinhada e tecido, nota-se que o valor obtido para o tecido corresponde a quase o triplo da energia absorvida pela mesma fibra na configuração alinhada. Isso se deve a possíveis características como:

- As FNL apresentam propriedades distintas devido ao plantio, tempo de crescimento da planta e tempo de colheita da fibra. Bem como o diâmetro do lúmen, ângulo microfibrilar que conferem maiores propriedades as fibras;
- Verificar se o molde do Barbosa é de silicone;
- E uma das principais características é devido à configuração da fibra dentro do compósito. No qual, a eficiência da distribuição de tensões com o reforço de tecido é muito maior quando comparadas com as fibras alinhadas.

E realizando uma análise quanto à configuração de tecido, o tecido de fique com matriz poliéster, obteve um valor aproximado ao tecido de buriti caracterizando que tais valores estão coerentes no ensaio. A superfície fraturada foi analisada no MEV para verificar os mecanismos de falha que ocorreram nos compósitos e estão apresentadas no item 4.2.2.3.

4.2.2.2 Ensaio de Impacto Izod

Os resultados obtidos no ensaio de impacto Izod para os compósitos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti, demonstraram existir uma boa capacidade de absorção de energia, bem como a outros materiais compósitos reforçados com FNLs (BLEDZKI E GASSAN, 1999; MARGEM, 2013; NASCIMENTO, 2017). A Tabela 4.16 apresenta os resultados das energias absorvidas no ensaio de impacto Izod para as amostras CETB10, CETB20 e CETB30, bem como a respectiva média e desvio padrão.

Tabela 4.16 - Resultados das energias absorvidas (J/m) no ensaio de impacto Izod para os compósitos reforçados com tecido de buriti.

Amostras	CETB10 (J/m)	CETB20 (J/m)	CETB30 (J/m)
1	378,43	342,80	360,04
2	391,22	290,70	302,75
3	380,95	237,19	349,46
4	238,91	266,92	482,63
5	293,84	285,17	549,45
6	220,34	300,97	235,51
7	228,57	291,55	445,99
8	356,14	313,09	226,20
9	392,51	223,05	276,05
10	315,79	331,75	469,92
11	231,44	200,17	336,76
12	391,97	239,19	342,03
13	283,55	311,91	445,92
14	273,07	232,16	556,05
15	238,55	276,75	592,53
Média	307,68	276,23	398,09
Desvio Padrão	68,27	42,11	117,48

A Erro! Fonte de referência não encontrada. é mostrada o gráfico que relaciona a média das energias absorvidas pelos compósitos no ensaio de impacto Izod com o percentual de reforço de tecido de buriti, bem como os respectivos desvios padrões.

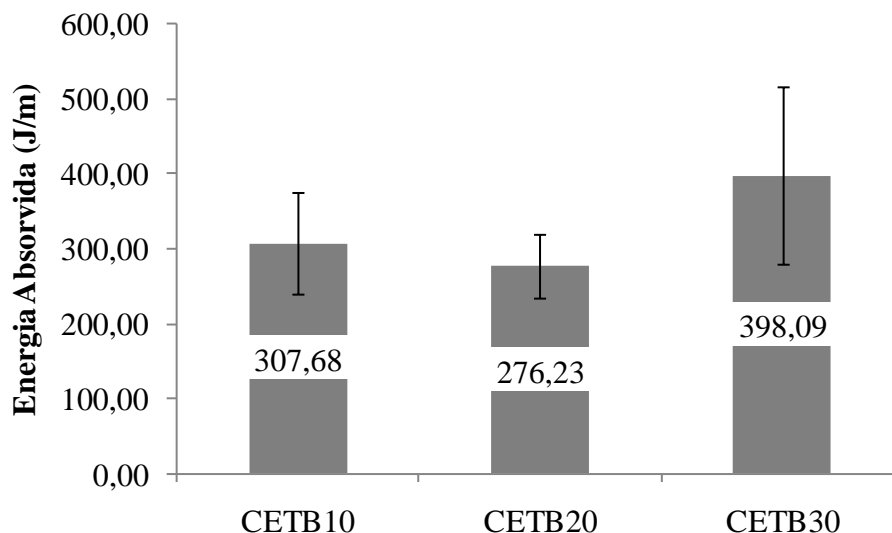


Figura 4.20 - Energia de impacto Izod versus percentuais dos compósitos analisados.

Como observado na Tabela 4.16 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as energias absorvidas no ensaio de impacto Izod não tiveram o mesmo comportamento de crescimento que as energias absorvidas no ensaio de impacto Charpy. Portanto os dados foram tratados estatisticamente pela ANOVA para verificar se as amostras possuem diferença em seus reforços. Os dados da estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.17 - Análise de variância da energia de impacto Izod para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	Dms
Tratamentos	2	120061	60030	8,90	3,23	
Resíduo	42	283302	6745			62,38
Total	44	403363				

De acordo com os dados obtidos na ANOVA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) rejeita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, têm-se: F calculado (8,90) > F crítico ou tabelado (3,23). Portanto, as frações volumétricas de tecidos de buriti nos compósitos de matriz epóxi têm efeitos diferentes na energia de impacto Izod. Em vista disso, aplicou-se o Teste de Tukey para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95% a fim de verificar qual fração volumétrica de tecido de buriti proporcionou melhores resultados em termos de energia de impacto Izod. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi 62,38 J/m. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios da energia de impacto Izod entre as amostras CETB10, CETB20 e CETB30. Além disso, os valores maiores que d.m.s. são apresentados em negrito.

Tabela 4.18 - Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Izod pelo teste de Tukey.

	CETB10	CETB20	CETB30
CETB10	-	31,46	90,40
CETB20	31,46	-	121,86
CETB30	90,40	121,86	-

Com base nesses resultados, observa-se que entre o CETB10 e o CETB20 não apresentam uma diferença significativa. Entretanto, quando compara-se o CETB10 com o

CETB30 apresenta que o teor de reforço influencia na absorção de energia. Em vista disso, apresenta-se com nível de significância de 5%, que o CETB30 apresentou melhor desempenho, pois exibiu maior valor de energia média de impacto Izod (398,09 J/m), e este é significativamente diferente dos demais, pois as diferenças encontradas são superiores ao d.m.s (62,38 J/m). Fato semelhante também foi comprovado por outros trabalhos envolvendo energia de impacto em CFNLs (MARGEM, 2013; CANDIDO, 2014; GOMES, 2015).

A fim de realizar uma comparação entre, o valor obtido para o ensaio de impacto Izod, CETB30 e outros compósitos reforçados com o mesmo teor de FNLs, apresenta-se a Tabela 4.15. O objetivo era realizar uma análise da diferença de absorção de energia para as diferentes configurações dos compósitos.

Tabela 4.19 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy para os compósitos de 30% de reforço e comparação com os outros autores.

Material	Reforço (%)	Orientação	Média (J/m)	Referência
Buriti/Epóxi	30	Tecido	398,09	*PT
Buriti/Epóxi	30	Fibra	297,95	BARBOSA, 2010
Curauá/Poliéster	30	Fibra	190,00	FERREIRA et al, 2018
Rami/Epóxi	30	Tecido	285,40	DIAS et al, 2016
Coco/poliéster	40	Fibra	121,00	FERREIRA et al, 2018
Rami/Epóxi	30	Fibra	353,38	MONTEIRO et al, 2009
Piaçava/Epóxi	30	Fibra	209,00	PEREIRA et al, 2017.a
Fique/Poliéster	30	Tecido	260,00	PEREIRA et al, 2017.b
Malva/Epóxi	30	Fibra	498,86	NASCIMENTO, 2017

*PT - Presente Trabalho

Realizando uma análise entre os valores obtidos para o compósito epoxídico reforçado com buriti em diferentes configurações: fibra alinhada e tecido, nota-se que o valor da energia absorvida para o tecido corresponde a quase 35% a mais que a energia absorvida pela mesma fibra na configuração alinhada. Além disso, realizando uma análise quanto a outras FNLs, têm-se que a fibra de rami foi a que apresentou um valor mais próximo do CETB30. E a fibra de malva apresentou um valor de 100J/m a mais que o tecido de buriti, uma possível justificativa para o caso é que a fibra de malva apresenta o teor de celulose altíssimo,

aproximadamente 82%, ou seja, a resistência da fibra de malva é maior que a da fibra de buriti.

4.2.2.3 Comparativo entre os ensaios de impacto

Os ensaios de impacto Charpy e Izod apresentam algumas diferenças que variam desde o tamanho das amostras, a condição de análise, isto é, o ensaio de impacto Charpy as amostras são analisadas na condição menos crítica que as amostras analisadas no ensaio de Izod, pois o impacto Izod as amostras são fixadas e o martelo é conferido na mesma face do entalhe. Sabendo disso e verificando que os dados obtidos nos dois ensaios obtiveram comportamentos, como esperado, bem diferente um do outro, optou-se em apresentar um gráfico comparativo entre as médias das energias absorvidas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**2 apresenta os resultados obtidos em cada ensaio para os teores de CETB10, CETB20 e CETB30, bem como os desvios padrões de cada compósito.

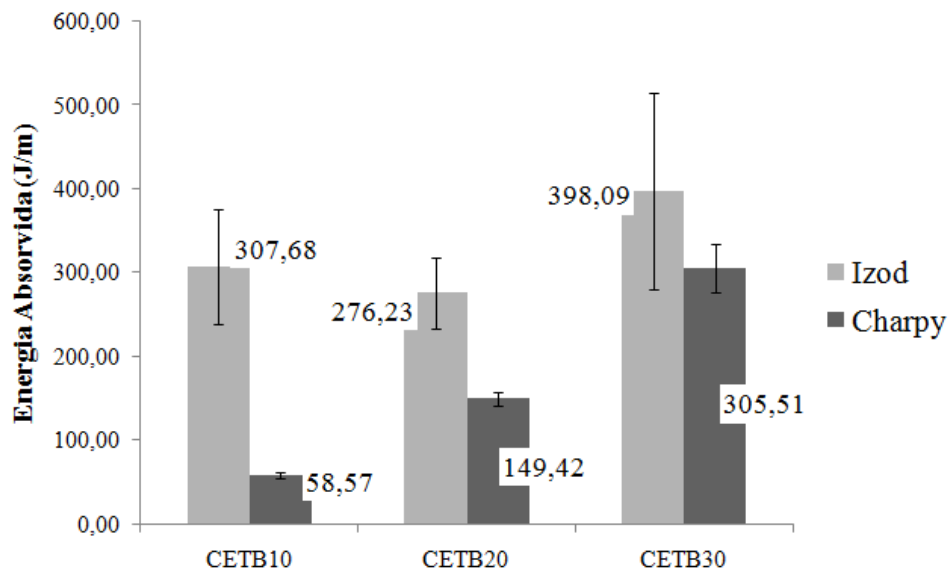


Figura 4.21 - Energias absorvidas pelos ensaios de impacto, Charpy e Izod, para os compósitos reforçados com tecido de buriti.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** permite observar a diferença entre as absorções de energia dos compósitos reforçados com tecido de buriti. Nota-se que o ensaio de impacto Charpy apresentou um comportamento proporcional, isto é, a medida que aumentava o teor do reforço a energia absorvida também aumentava. Ainda analisando as médias de

energias absorvidas no ensaio Charpy, nota-se que elas cresceram quase o dobro entre um teor e outro. Entretanto, quando realizamos a análise para o ensaio Izod, nota-se que o CETB20 teve um decréscimo de energia quando comparada com o CETB10, uma possível justificativa para o caso é que devido a difícil interação da matriz com a fibra, possíveis bolhas internas no compósito podem ter ficado remanescentes e com isso causar uma redução na absorção de energia. Realizando agora, uma análise para as energias absorvidas pelos CETB30 nos dois ensaios, é possível observar que o impacto Izod (398,09J/m) apresentou uma absorção de energia maior que o impacto Charpy (305,51 J/m), representando uma relação de 30% de diferença entre eles. Contudo, se analisarmos o desvio padrão deles, a confiabilidade do resultado favorece o ensaio de impacto Charpy, pois o seu desvio padrão é menor. É possível justificar que o aumento da variação de energia absorvida pelas amostras está associada a propagação perpendicular a face de impacto, ou seja, as trincas se propagam preferencialmente entre a superfície do tecido de buriti e matriz de epóxi (PEREIRA et al, 2017c).

A fim de realizar uma análise microscópica do ensaio de impacto, amostras do CETB10, CETB20 e CETB30 foram submetidas ao MEV para verificar o comportamento das fibras e da matriz após o ensaio. O intuito de realizar uma única análise de MEV para os dois ensaios é porque, como fora notado na literatura, as características internas são muito semelhantes, ou seja, as marcas de rio, arrancamento das fibras, fratura das fibras, entalhe e indentação do tecido na matriz são corriqueiras em todos os casos (MONTEIRO et al, 2009, PEREIRA et al, 2017.a, PEREIRA et al, 2017.b, NASCIMENTO, 2017). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta essas características de fratura de compósitos reforçados com FNLs.

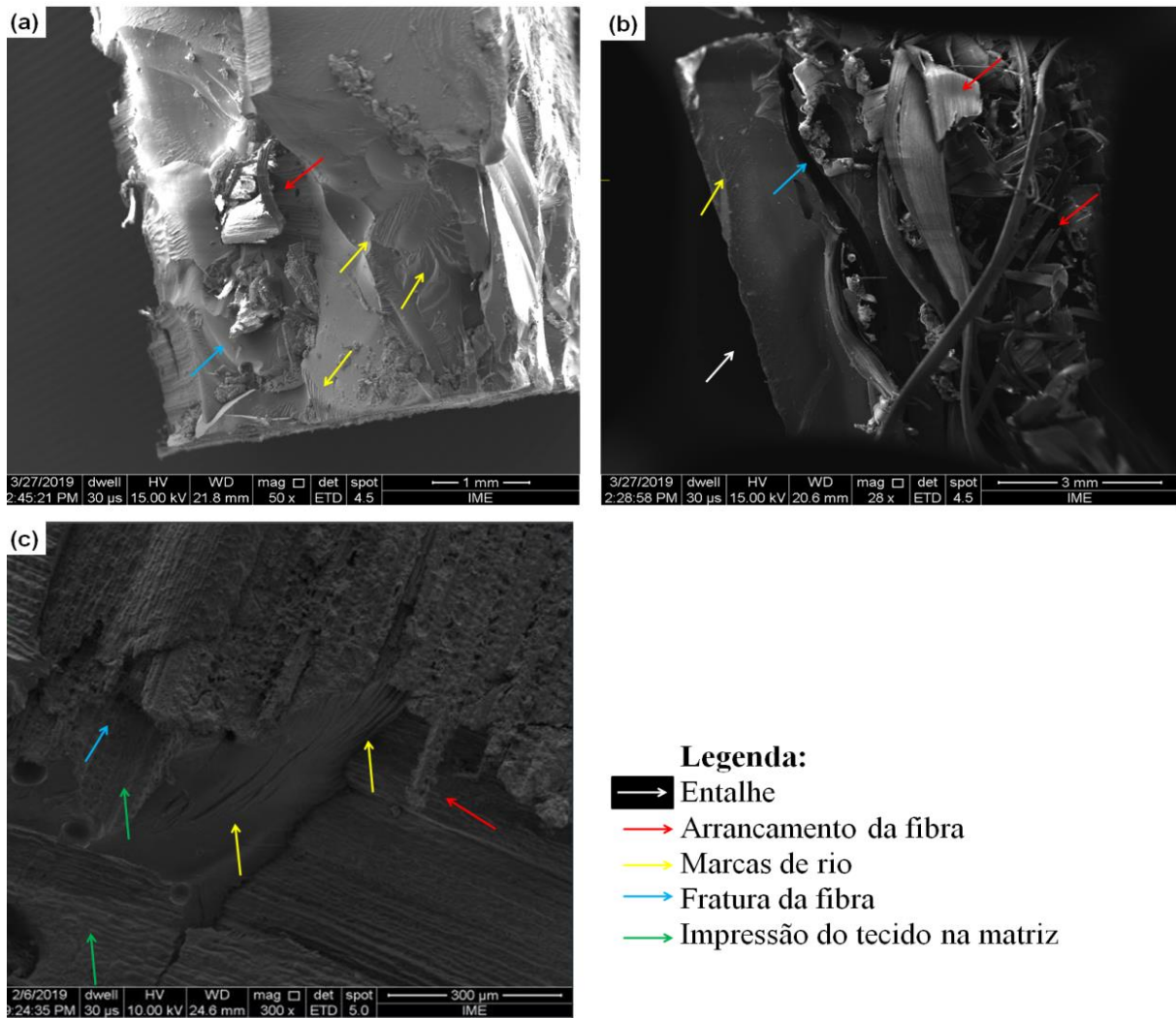


Figura 4.22 - Micrografia obtidas por MEV das amostras de (a) CETB10, (b) CETB20 e (c) CETB30 e a legenda explicativa das setas.

As **Erro! Fonte de referência não encontrada.**a, b e c apresentam, respectivamente, as regiões de fratura das amostras CETB10, CETB20 e CETB30. Realizando uma análise visual para o CETB10, percebe-se a tendência de fratura frágil, pela presença das marcas de rio o que está indicado pela seta amarela, e confirmada pelos valores de energia de impacto presente nas tabelas (Tabela 4.12 e Tabela 4.16). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**b percebe-se uma atuação maior das fibras no mecanismo de fratura, evidenciando fibras rompidas, arrancadas e a impressão do tecido na matriz indicadas respectivamente pelas setas azul, vermelho e verde. Além dessas características das fraturas das fibras da matriz, vale-se ressaltar que a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**b apresenta o entalhe proferido nas amostras, incrivelmente essa amostra apresenta um entalhe feito na matriz e em seguida os tecidos de buriti realizando uma barreira na propagação da

trinca desviando o seu percurso. Tal característica também foi encontrada por BLEDZKI & GASSAN em 1999.

4.2.3 ENSAIO BALÍSTICO

4.2.3.1 Ensaio Balístico de velocidade residual

Com o objetivo de avaliar o desempenho do compósito, sem a camada frontal de cerâmica, realizou-se o ensaio de energia absorvida (E_{abs}) e de velocidade residual (V_r) para os compósitos de buriti. Para este ensaio foram produzidas oito amostras de cada teor de reforço (CETB10, CETB20 e CETB30). O esquema utilizado para essa análise está representado nas duas figuras, Figura 3.13 e Figura 3.14, e para calcular as respectivas E_{abs} e V_r , utilizou-se as equações (EQ. 2.1 e EQ. 2.2). Neste ensaio todas as amostras foram perfuradas e atravessadas pelo projétil, como ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e dessa maneira foi permitido capturar a velocidade do projétil antes e após o impacto com o auxílio de um radar Doppler.



Figura 4.23 - Aspecto geral dos compósitos reforçados com tecido de buriti após o ensaio de velocidade residual.

A presente pesquisa optou em analisar, separadamente, as E_{abs} e as V_L dos compósitos reforçados com tecidos de buriti, pois como apresentado no item 2.1 são os dois parâmetros considerados importante para avaliação de materiais utilizados como blindagem. Portanto, em

primeira análise, apresentar-se-á os dados obtidos para as energias absorvidas para os CETB10, CETB20 e CETB30. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as médias das energias absorvidas e os respectivos desvios padrões.

Tabela 4.20 - Energia absorvida após o ensaio de velocidade residual para os compósitos com tecido de buriti.

Amostra	Energia absorvida (J)	Desvio Padrão
CETB10	163,12	46,20
CETB20	177,91	76,38
CETB30	182,91	73,89

Nota-se que os resultados obtidos para E_{abs} dos compósitos acompanhou um crescimento proporcional ao aumento de reforço do tecido de buriti. Contudo, não é possível concluir se há diferenças entre as amostras apenas com os resultados de média e desvio padrão. Por isso, para que se obtenha um resultado fidedigno é necessário que uma análise estatística seja aplicada. A Tabela 4.21 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA) desses dados.

Tabela 4.21 - Análise da variância para os resultados de E_{abs} pelo método da velocidade residual.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	Dms
Tratamentos	2	1693	847	0,24	3,40	48,91
Resíduo	21	73779	3513			
Total	23	75473				

De acordo com os resultados obtidos na análise de variância da Tabela 4.21 aceita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, têm-se: F calculado (0,18) < F crítico (3,40). Portanto, não houve diferenças entre os teores de reforço em relação à energia absorvida pelo projétil. Desse modo, analisar-se-á as comparações entre as V_L dos compósitos, a fim de verificar o segundo critério aplicado para blindagens balísticas. Os resultados médios obtidos para as V_L dos CETB10, CETB20 e CETB30 estão apresentados na Tabela 4.22, bem como os seus respectivos desvios padrões. Além disso, na mesma tabela realiza-se uma comparação da V_L de outros compósitos reforçados com FNLs, optou-se em utilizar os dados da literatura para os reforços com 30%,

pois foi teor máximo de reforço utilizado na presente pesquisa e, consecutivamente, o que apresentou melhor resultado.

Tabela 4.22 - Velocidade limite após o ensaio de velocidade residual para os compósitos com tecido de buriti.

Amostra	Configuração	Velocidade Limite (m/s)	Referência
CETB10	Tecido	181,99 ± 24,21	*PT
CETB20	Tecido	189,52 ± 29,55	*PT
CETB30	Tecido	190,67 ± 39,38	*PT
Epóxi/piaçava	Fibra	202,76 ± 7,62	GARCIA FILHO, 2018
Epóxi/Malva	Fibra	229,54 ± 10,06	NASCIMENTO, 2017
Epóxi/Malva	Tecido	231,71 ± 18,14	NASCIMENTO, 2017
Poliéster/Juta	Tecido	200,00 ± 24,5	DE ASSIS, 2016
Poliéster/Sisal	Fibra	169 ± 9	BOLZAN, 2016
Epóxi/ Sisal	Fibra	188,09	DE ARAÚJO, 2015
Epóxi/ Bambu	Fibra	198,28	CRUZ, 2015
Poliéster/Curauá	Fibra	207 ± 21	BRAGA, 2015
Laminado de Kevlar™	Tecido	212 ± 23	BRAGA, 2015
Epóxi/ Juta	Tecido	176,16	LUZ, 2014

De acordo com os dados da Tabela 4.22, nota-se que o CETB30 apresentou a maior velocidade limite quando comparado com os outros compósitos epoxídicos reforçados com tecido de buriti. Realizando uma comparação da V_L obtida pelo CETB30, o resultado apresentou valores mais altos que os compósitos de poliéster com sisal (BOLZAN, 2016) e epóxi com juta (LUZ, 2014). Ainda de acordo com o valor da V_L do CETB30, é possível considerar que esta amostra possui um valor comparável ao do compósito de epóxi com sisal (DE ARAUJO, 2015). Entretanto, se compararmos a outros compósitos tem-se que a fibra de buriti apresenta uma diferença de V_L até 20% que é o caso da diferença do CETB30 comparado com o epóxi com malva (NASCIMENTO, 2017). Com base nesses resultados comparativos, conclui-se que quanto maior o valor de V_L , melhor o desempenho balístico, visto que o compósito resiste a munições com maior poder de penetração. Portanto, o tecido

de buriti não é o mais adequado para reforço de blindagens, pois dentre os dados da Tabela 4.22 a fibra de malva apresenta em média uma V_L de 230 m/s.

4.2.3.2 Ensaio balístico plastilina

Realizar-se-á uma comparação prévia dos resultados obtidos para os SBM produzidos com LiF e sem LiF, ou seja, serão analisados e tratados estatisticamente cada compósito produzido com a primeira camada, com diferentes composições cerâmicas, para afirmar se a presença do LiF com o seu alto teor de densificação favorece o SBM na baixa indentação na plastilina. Posteriormente, serão consideradas as cerâmicas com menor valor de indentação e realizar-se-á a comparação entre os teores de reforço com tecido de buriti para afirmar, pela ANOVA, se os teores de reforço apresentam diferenças entre si. Por fim, serão analisados os SBM feitos com a terceira camada de Kevlar™, com o intuito de verificar uma possível aplicação do SBM para nível III.

Adotar-se-á a seguinte nomenclatura para facilitar as explicações do tipo de SBM que está sendo analisado. O SBM com a placa de alumínio terá a nomenclatura de SBMT, pois considera-se que a chapa de alumínio é o tipo mais usual (tradicional) de blindagem multicamada. E para o SBM com a placa de aramida, será utilizada a nomenclatura SBMA. Os dados de cada ensaio estão apresentados nos tópicos a seguir.

4.2.3.2.1 Ensaio na plastilina para a primeira camada com e sem LiF

A análise foi aplicada ao SBMT considerando um grupo amostral de, para cada teor de reforço compósito, cinco amostras de pastilhas cerâmicas com LiF e cinco pastilhas cerâmicas sem LiF. Os dados obtidos para as indentações estão apresentados na Tabela 4.23, bem como suas respectivas médias e desvios padrões.

Tabela 4.23 - Indentação na plastilina para os compósitos com camada frontal diferenciadas.

CETB10		CETB20		CETB30	
Sem LiF	Com LiF	Sem LiF	Com LiF	Sem LiF	Com LiF

18,92 ± 1,20	19,73 ± 1,12	21,01 ± 1,81	22,94 ± 1,20	22,53 ± 2,46	27,40 ± 1,80
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

De acordo com os resultados da Tabela 4.23 nota-se que as cerâmicas com a presença do LiF, apesar da sua boa densificação, não favorece a indentação na plastilina. As indentações das cerâmicas com LiF apresentaram um aumento nas médias das leituras, por isso os dados foram tratados estatisticamente pela ANOVA para afirmar se existe diferença entre as amostras com LiF e Sem LiF (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Tabela 4.24 - ANOVA para as leituras da indentação na plastilina para os SBM com a camada frontal diferenciada.

CETB10						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	Dms
Tratamentos	1	31,40	31,40	6,64	5,32	2,86
Resíduo	8	37,85	4,73			
Total	9	69,25				
CETB20						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	Dms
Tratamentos	1	9,27	9,27	8,75	5,32	1,35
Resíduo	8	8,48	1,06			
Total	9	17,75				
CETB30						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	Dms
Tratamentos	1	59,34	59,34	12,65	5,32	2,85
Resíduo	8	37,52	4,69			
Total	9	96,86				

De acordo com os dados obtidos na ANOVA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) rejeita-se, para todos os casos, a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, para todos os casos o F calculado foi superior ao F crítico. Portanto, a presença do LiF têm efeitos diferentes na indentação da plastilina.

Em especial, para esse caso, não foi utilizado o teste de Tukey por que pela ANOVA já caracterizou que a presença do LiF caracterizava a diferença das amostras, isto é, aumentava as leituras de indentação na plastilina. Entretanto, foram plotados gráficos comparativos das amostras para ilustrar melhor a diferença das indentações. O gráfico está apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

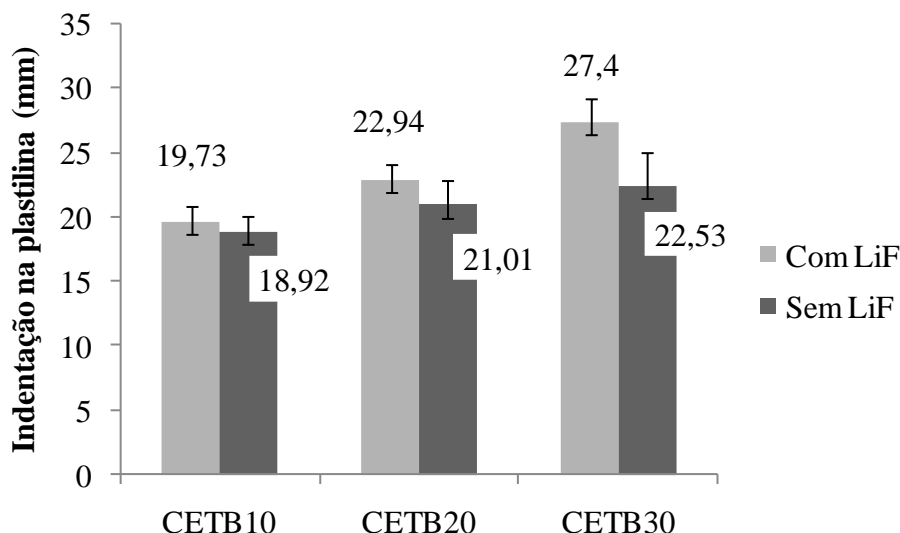


Figura 4.24 - Comparação da indentação na plastilina para os SBM produzidos com camada frontal diferenciadas.

Com base nos dados da Tabela 4.23 e com a facilidade da leitura dos dados pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se notar que a presença do LiF aumentou a indentação na plastilina em cerca de 5 a 20%, isto é, se analisarmos a indentação do CETB10 produzido com LiF ele apresenta um aumento de aproximadamente 5% na leitura do trauma na plastilina. É passível de achar que esse aumento no CETB10 não é tão significativo, entretanto, se olharmos o CETB30, encontra-se um aumento de aproximadamente 20% e isso é um aumento considerável quando pensamos que esse material será utilizado para uma proteção de uso pessoal e os impactos podem afetar os órgãos internos dos combatentes. Sobreleva-se que mesmo com o aumento na indentação, todos os valores obtidos ficaram bem abaixo do limite estipulado pela NIJ 0101.04, ou seja, todos os valores foram abaixo de 44 mm. Vale salientar que a presença do LiF para este tipo de blindagem, balística, não apresentou características favoráveis, entretanto se analisarmos outras aplicações de blindagem, por exemplo radioativas, é possível que a alta densificação apresente resultados favoráveis.

Com base nos resultados deste item, a presente pesquisa optou em considerar os valores das amostras com as cerâmicas sem a adição de LiF para verificar se haveria diferença entre os compósitos na indentação da plastilina. Os dados considerados pelos SBM com os diferentes teores de tecido de buriti estão apresentados no próximo capítulo.

4.2.3.2.2 Ensaio na plastilina para a camada secundária diferenciada

Como citado no item anterior, os SBMT produzidos com as cerâmicas com menor indentação na plastilina foram as amostras cerâmicas de alumina, aditivada com nióbia. Portanto, o presente capítulo utilizará os dados dessas cerâmicas e analisará se há diferença entre os teores de reforço de tecido de buriti. Dessa forma, a Tabela 4.25 apresenta as indentações médias obtidas para as 5 amostras do CETB10, CETB20 e CETB30.

Tabela 4.25 - Indentação na plastilina para os SBMT reforçados com tecido de buriti.

CETB10	CETB20	CETB30
18,92 ± 1,20	21,01 ± 1,81	22,53 ± 2,46

Como observado na Tabela 4.25, as indentações foram crescentes conforme aumentava-se o teor de reforço com tecido de buriti. Contudo para que afirmasse com confiança se as amostras possuíam diferença, elas foram tratadas estatisticamente pela ANOVA. Portanto os dados estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.26 - Análise de variância do SBMT para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	dms
Tratamentos	2	32,90	16,45	3,81	3,89	2,73
Resíduo	12	51,82	4,32			
Total	14	84,72				

De acordo com os dados obtidos na ANOVA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) aceita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, têm-se: F calculado (3,81) > F crítico ou tabelado (3,89). Portanto, as frações volumétricas de tecidos de buriti nos compósitos de matriz epóxi não possuem efeitos diferentes no trauma provocado na plastilina.

É importante salientar que a indentação causada na plastilina não é o único critério analisado, é preciso verificar a integridade das amostras após o ensaio balístico. Em vista disso, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as características gerais dos SBMT reforçados com tecido de buriti.

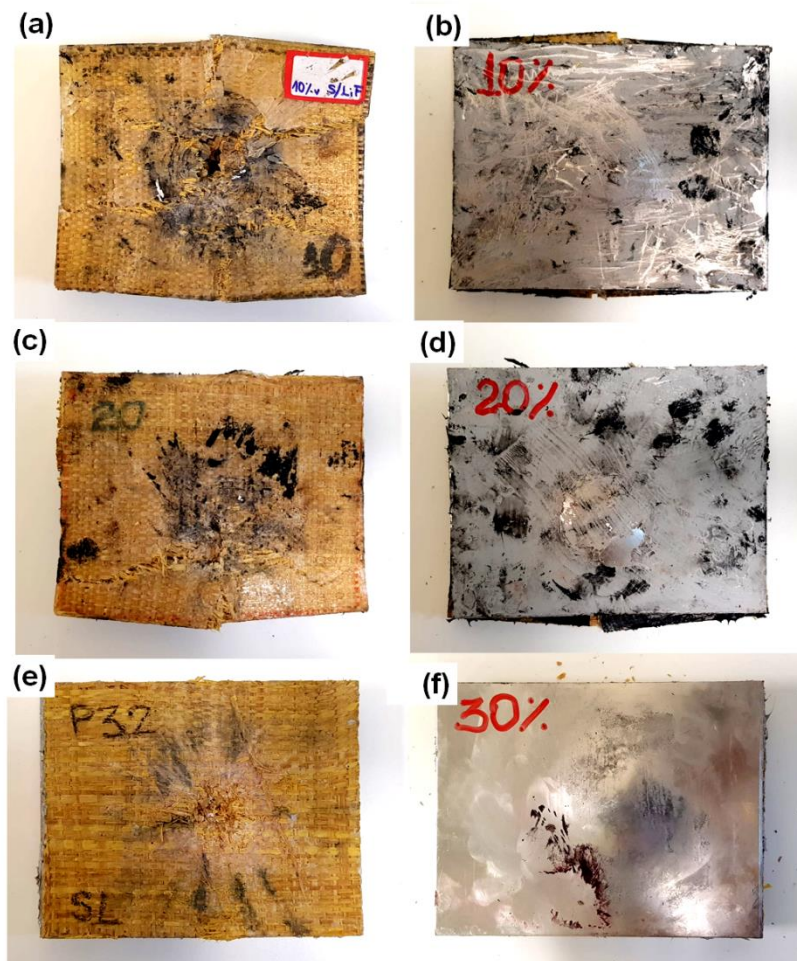


Figura 4.25 - SBMT após ensaio balístico (a) frente da amostra do CETB10, (b) verso da amostra do CETB10, (c) frente da amostra do CETB20, (d) verso da amostra CETB20, (e) frente da amostra do CETB30 e (f) verso da amostra do CETB30.

Ressalta-se que de acordo com os resultados obtidos (Tabela 4.25), pode-se verificar que CETB10 foi o que apresentou menor indentação na plastilina. Tal comportamento pode estar diretamente relacionado à característica frágil da matriz de epóxi, que tende a dissipar energia pela criação de superfícies de fratura, ou seja, o reforço de tecido não foi feito em uma quantidade efetiva. Por outro lado, os dados obtidos para os CETB20 e CETB30 apresentaram o valor de indentação na plastilina superior àquele exibido para a condição CETB10. Isto pode ser associado à mudança dos mecanismos de fratura, a partir de um material com características mais frágeis, sem um reforço efetivo, transformando-se mais resistente com o aumento da porcentagem de fibras empregadas no reforço.

Considerando o aspecto final da placa compósita, ou seja, a integridade dos compósitos, a condição que mais se destaca entre as investigadas é o CETB30. Embora tal condição tenha apresentado uma indentação maior que o CETB10. Em comparação com a

outra condição, CETB20, a indentação causada na plastilina foi menor, e não ocorreu a total fragmentação do compósito. Entretanto, quanto maior a quantidade de tecido de buriti, mais atrativo economicamente se torna o compósito, conforme será discutido mais a frente.

Após o ensaio balístico as amostras foram submetidas ao MEV para analisar a área que recebeu o disparo e consecutivamente a aderência das partículas cerâmicas nesta região. **A Erro! Fonte de referência não encontrada..a** ilustra a fibra de buriti como recebida e **A Erro! Fonte de referência não encontrada..b**, destaca a característica de incrustação das partículas cerâmicas indicando absorção de energia cinética por Van der Waals (MONTEIRO et al, 2011; LUZ et al, 2015; MONTEIRO et al, 2018). Além disso, é possível comparar, neste caso de absorção das partículas cerâmicas, que a fibra de buriti possui a mesma característica da fibra de Kevlar™ (**Erro! Fonte de referência não encontrada..c**).



Figura 4.26 - Micrografia da fibra de Buriti (a) antes do ensaio balístico, com um aumento de 2500x e (b) após o ensaio balístico, com um aumento de 1300x e (c) fibra de Kevlar™ após ensaio balístico (Adaptado) (BRAGA et al, 2017).

4.2.3.2.3 Ensaio na plastilina para a terceira camada diferenciada

Ainda de acordo com os resultados obtidos no item 4.2.3.2.1 foram produzidas 5 amostras do SBMA com as respectivas considerações, as camadas frontais sendo de pastilhas cerâmicas de alumina dopada com nióbio e para cada teor de reforço de tecido de buriti (CETB10, CETB20 e CETB30). Os resultados das indentações médias obtidos para os SBMA estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 4.27 - Indentação na plastilina para os SBMA reforçados com tecido de buriti.

CETB10	CETB20	CETB30
32,71 ± 5,24	27,55 ± 2,08	34,73 ± 6,32

Como observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as indentações não apresentam um crescimento sequencial esperado, em que conforme aumentava-se o teor de reforço de tecido de buriti aumentava-se a indentação na plastilina. Por tais motivos, os dados foram aplicados na ANOVA para afirmar com confiança se as amostras possuíam diferença. Desse modo a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os dados tratados estatisticamente.

Tabela 4.28 - Análise de variância do SBMT para os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de tecido de buriti.

Causas de variaç	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	dms
Tratamentos	2	41459	20729	475,39	3,89	8,69
Resíduo	12	523	44			
Total	14	41982				

De acordo com os dados obtidos na ANOVA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) rejeita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, têm-se: F calculado (475,39) >> F crítico ou tabelado (3,89). Portanto, as frações volumétricas de tecidos de buriti nos compósitos de matriz epóxi têm efeitos diferentes no trauma provocado na plastilina. Em vista disso, aplicou-se o Teste de Tukey para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95% a fim de verificar qual fração volumétrica de tecido de buriti proporcionou melhores resultados em termos de indentação na plastilina. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi 8,69 mm. A Tabela 4.29 mostra os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios das leituras de indentação para as amostras CETB10, CETB20 e CETB30. Além disso, os valores maiores que d.m.s. são apresentados em negrito.

Tabela 4.29 - Comparação entre as médias de indentação na plastilina para os SBMA pelo teste de Tukey.

CETB10	CETB20	CETB30
--------	--------	--------

CETB10	-	5,16	2,02
CETB20	5,16	-	7,18
CETB30	2,02	7,18	-

Com base nesses resultados, nota-se que pela análise das diferenças médias significativas os diferentes teores de reforço de tecido de buriti nos compósitos não apresentaram diferenças entre si. Sobreleva-se que apesar das indentações na plastilina apresentarem valores razoavelmente altos, não houve a perfuração de nenhuma amostra do SBMA, um dos fatores cruciais para as blindagens balísticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

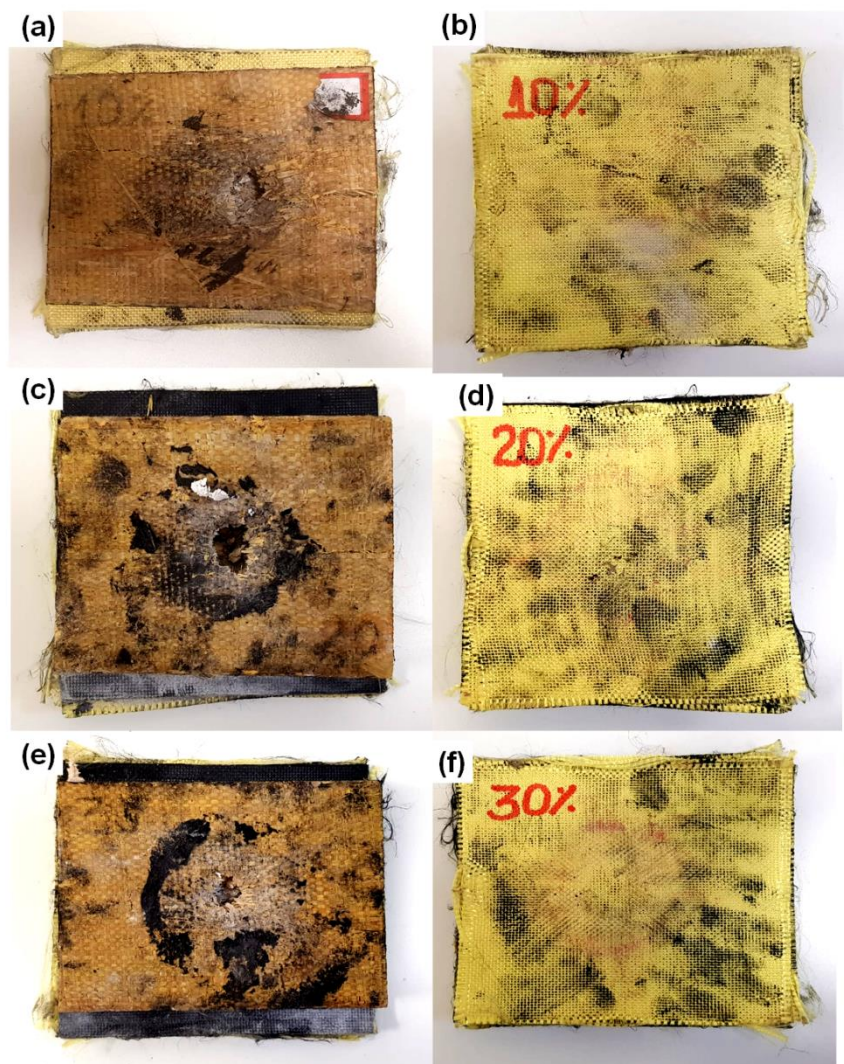


Figura 4.27 - SBMA após ensaio balístico (a) frente da amostra do CETB10, (b) verso da amostra do CETB10, (c) frente da amostra do CETB20, (d) verso da amostra CETB20, (e) frente da amostra do CETB30 e (f) verso da amostra do CETB30.

4.2.3.2.4 Comparativo entre os dois SBMs

Com o intuito de realizar uma comparação para os dois SBMs utilizados nessa pesquisa, o presente tópico apresenta, de forma condensada, todos os dados discutidos anteriormente. Portanto, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra, no gráfico de barras, as leituras médias das indentações provocadas na plastilina. Além disso, para que o resultado fosse fidedigno considerou-se as indentações da camada frontal sem LiF, para que a comparação fosse feita apenas analisando a placa de alumínio e a placa de aramida. O objetivo de realizar essa comparação era apresentar e afirmar se os valores são favoráveis e atrativos para a produção das blindagens pessoais. Vale ressaltar que as camadas de aramida não foram utilizadas com a finalidade de substituir o alumínio e sim simular um nível de proteção nível III-A, visando a utilização do conjunto cerâmica mais compósito como inserto, para transformar para nível III. Portanto, os dados comparativos das indentações na plastilina para os dois SBMs estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

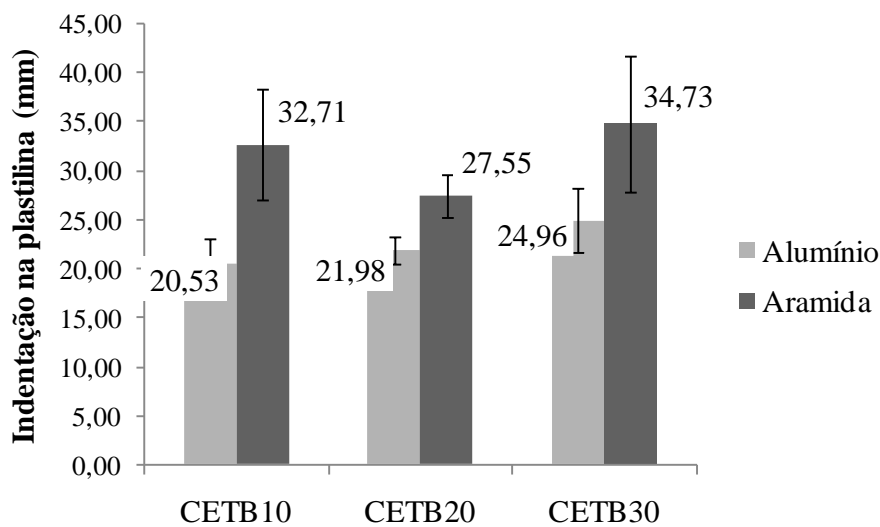


Figura 4.28 - Comparação dos SBM com a terceira camada sendo SBMT e SBMA uma placa de alumínio de acordo com sua indenteção.

Como fora notado anteriormente pelos valores das Tabela 4.25 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a presença da terceira camada de aramida não apresentou valores favoráveis, ou seja, o trauma provocado na plastilina foi maior que o SBMs produzido com a placa de alumínio. Comparando os valores médios das indentações dos compósitos,

cada teor de reforço CETB10, CETB20 e CETB30 apresentou 60, 25 e 40% de aumento nas indentações.

Existem algumas possíveis explicações para o caso, dentre elas é que em algumas amostras os projéteis pegaram na borda da cerâmica e com isso a cerâmica não conseguiu absorver os 65% que ela absorveria projétil tivesse acertado o centro da cerâmica (NASCIMENTO, 2017). Outra possível justificativa é que como a chapa de alumínio é um material monolítico e não tem nenhuma presença de vazios ela tende a absorver mais energia que a placa de aramida que tem uma grande quantidade de lacunas entre as tramas do tecido. Por fim, justifica-se também que, de acordo com Braga (2015) e Nascimento (2017), a absorção de energia do impacto do projétil para as placas de alumínio está em torno de 7,28% enquanto que para a placa de Aramida está em torno de 6,10% e tais características podem ser deduzidas pelo caráter dúctil do alumínio. Portanto, de acordo com os dados obtidos na presente pesquisa, verifica-se que o SBMT já age como o nível III e não precisaria ser utilizado como um inserto no colete de nível III-A. Ao contrário do SBMA, que foi submetido a uma simulação de nível III-A e apresentou um desempenho abaixo do SBMT.

Por fim, realizando uma comparação geral dos SBM nota-se que, dentre os resultados obtidos nos ensaios, os SBM produzidos com a terceira camada sendo a placa de aramida e a camada frontal dopada com LiF, materiais não são atrativas para aplicação e produção industrial. Isso se dá pelos valores de alta indentação na plastilina e por terem custos mais altos para a aplicação desses materiais para a blindagem balística. Por adentrar no assunto de custos, o próximo item refere-se aos custos utilizados para produção dos SBMs.

4.3 ANÁLISE DE CUSTO E PESO

As FNLs possuem características e propriedades muito vantajosas e uma das principais vantagens ao utilizar as FNLs como reforço de materiais compósitos diz respeito ao custo associado à fabricação desses materiais. E mesmo para as FNLs que são rejeitos de indústria, em geral têm custos de produção muito baixos que vão impactar diretamente no custo de produção dos materiais compósitos (CANDIDO, 2014). Ao serem comparados com materiais usualmente empregados para aplicações balísticas, como Kevlar™, a utilização de materiais

compósitos reforçados com FNLs é economicamente favorável como será apresentado a seguir.

As informações de cada componente foram obtidas por uma estimativa do custo disponível na literatura (NASCIMENTO, 2017; DE ASSIS, 2016; BOLZAN, 2016; LUZ, 2014), bem como por meio dos dados obtidos dos fornecedores. O custo do tecido de buriti foi considerado o valor de aquisição no mercado local de Manaus-Amazonas e verificado com o valor do IBEGE (2019). Foi considerado que o SBMTs possui área de 225 cm³, o que representa dimensões de 12,00x15,00x1,19 cm³. Quanto a espessura, o compósito, cerâmico e laminado de KevlarTM tem espessura de 10 mm, enquanto que a placa de alumínio possui a espessura de 5 mm. Os dados referentes aos custos dos componentes que integram o SBM estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.30 - Custos e peso dos componentes do SBMTs.

Componente	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Peso (Kgf)	Custo unitário (US\$/Kg)	Custo Total (US\$)
Cerâmico	225	3,72	0,84	33,00	27,62
Laminado de KevlarTM	225	1,44	0,32	63,60	20,61
CETB10	225	0,99	0,22	TB - 0,082 E - 0,624	0,16
CETB20	225	0,97	0,22	TB - 0,081 E - 0,611	0,15
CETB30	225	0,96	0,22	TB - 0,080 E - 0,605	0,15
Liga de Alumínio	112,5	2,7	0,30	11,24	3,42
TB - Tecido de buriti				Custo do epóxi (US\$/Kg) - 2,8	
E - Epóxi				Custo do tecido de buriti (US\$/Kg) - 0,37	

Ainda de acordo com **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é notória a grande diferença de custo dos materiais para produção de uma placa de material compósito de FNL, da ordem de centavos de dólar, enquanto que para fabricar uma placa de laminado de KevlarTM o custo de produção seria duas ordens de grandeza maior.

Constata-se também à relação inversa entre quantidade de tecido de buriti utilizado como reforço e custo total do componente. O custo extremamente baixo do tecido de buriti

faz com que seja economicamente favorável a utilização de compósitos com maiores frações volumétrica de reforço na sua composição. A Tabela 4.31 apresenta um comparativo entre os custos totais de um SBMT utilizando o compósito CETB30 e o laminado de Kevlar™ como camada intermediária.

Tabela 4.31 - Comparativo entre peso e custos totais de um SBMT usando Kevlar™ e usando compósitos reforçados com tecido de buriti.

Peso total		Custo Total	
Kevlar	1,46		51,65
CETB30	1,36		31,19
Redução de peso (%)	7,37	Redução de custo (%)	39,61

Portanto nota-se que apesar da redução de peso associada à utilização do CETB30 como segunda camada não ser muito efetiva, apenas 7,37% em comparação com o laminado de Kevlar™. A redução do custo total é muito grande, acima de 40%. Tal resultado, como citado anteriormente, ilustra uma das principais vantagens da utilização de compósitos reforçados com FNLs ao invés de materiais usuais como o Kevlar™.

5 CONCLUSÕES

Foram estudadas algumas características específicas dos tecidos de buriti. E, também, foram analisados três teores de reforço de compósitos epoxídicos com tecido de buriti, bem como foram analisadas a presença do fluoreto de lítio nas cerâmicas para fins balísticos. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

- a) As condições de compósitos reforçados com tecido de buriti foram ensaiadas de acordo com NIJ 0101.04 (2000), e para todas as amostras a indentação na plastilina foi inferior ao que preconiza na norma como letal para o ser humano;
- b) Dentre os SBMs testados, a amostra de CETB10 apresentou a menor indentação, contudo, quanto a integridade e confiabilidade dos dados, o compósito CETB30 foi o que apresentou melhor desempenho balístico. Como vantagens adicionais, os SBMs representaram uma redução de aproximadamente 7% no peso e 40% no custo, levando em consideração a composição CETB30 em comparação ao SBM com Kevlar™.
- c) Os resultados obtidos para as amostras de inserto, SBMA, não apresentaram resultados atrativos, pois os conjuntos tiveram indentações de até 60% maior que os SBMT. Além disso, a indentação das amostras de SBMA chegou aproximadamente 34mm, apesar deste valor estar abaixo do limite estipulado pela NIJ 0101.04 (2000) considera-se um risco pois esse material será utilizado para uma proteção de uso pessoal e uma alta indentação na plastilina pode significar um lesionamento dos órgãos internos dos combatentes.
- d) As cerâmicas produzidas com Alumina e Nióbia apresentaram melhora na indentação da plastilina de até 20% quando comparadas as pastilhas cerâmicas dopadas com LiF. Portanto, para aplicação de blindagens balísticas a pastilha de $Al_2O_3+Nb_2O_5$ é melhor, porém não excluí a possibilidade de utilizar as cerâmicas com LiF para outro tipo de blindagem, por exemplo, blindagens contra radiações.
- e) Os valores da velocidade limite (V_L) e a energia absorvida (E_{abs}), para os compósitos epoxídicos reforçados com tecido de buriti apresentaram valores superiores em torno de 190 m/s e 182 J, respectivamente. Os valores encontrados se mostram coerentes em comparação a outros SBMs. Tomando como base outros

estudos, é válido destacar que a absorção de energia de cada componente, separadamente, não reproduz o desempenho balístico de um SBM devido ao efeito sinérgico e a atuação de outros mecanismos de absorção de energia.

- f) Os ensaios de impacto Charpy e Izod revelaram que as absorções de energia aumentava proporcionalmente a medida que aumentava o teor de tecido de buriti. O valor máximo alcançado para a energia Charpy foi de 305 J/m e para a energia Izod de 398 J/m, ambos para o compósito CETB30.
- g) O FTIR das fibras revelou a presença de grupos funcionais característicos dos principais constituintes das fibras naturais (celulose, hemicelulose e lignina). Isso corrobora com os dados térmicos apresentados nos ensaios de TGA/DTG, onde os eventos térmicos foram relacionados à degradação desses constituintes. E o ensaio de DRX possibilitou acrescentarmos informações na literatura sobre a cristalinidade do tecido de buriti utilizado nessa pesquisa, no qual o valor da cristalinidade encontrada foi de 63%. Tal índice de cristalinidade é comparável as demais fibras naturais.
- h) Por meio da análise de MEV das superfícies fraturadas dos compósitos, observou-se que, para os materiais testados como camada intermediária, houve a impregnação de pequenas partículas cerâmica nos tecidos, indicando que todos esses materiais contribuíram para a dissipação de energia através da captura de fragmentos, ou incrustação mecânica, por meio de forças de Van Der Waals. A análise de MEV também permitiu observar e medir a diferença entre as partículas das cerâmicas utilizadas. A presença do LiF apresenta uma ligeira modificação na morfologia e no tamanho da partícula. Além disso, foi observada a característica de fratura da cerâmica após o ensaio balístico, apresentando uma característica de fratura intergranular, no qual dissipa grande parte da energia de impacto do projétil. Além disso, verificou-se que o tecido de buriti contribuiu de maneira efetiva para aumentar a resistência da matriz de epóxi através dos mecanismos de absorção de energia, tais como, descolamento da interface fibra/matriz, trincas produzidas ao longo das fibras, fratura frágil do tipo “marca de rio” da matriz de epóxi e a resistência à propagação de trincas pelo entrelaçamento do tecido.
- i) Os ensaios de TGA/DTG mostraram, para os compósitos de tecido de buriti, uma perda de massa variando de 10% para o primeiro estágio, no qual a temperatura varia de 23 a 200°C, e essa perda de massa esta ligada a perda de umidade da

fibra. Os compósitos CETB20, CETB20 e CETB30 apresentaram uma estabilidade térmica até o início da significativa perda de massa que ocorre aproximadamente a 325°C. A temperatura máxima de trabalho para o compósito considerada foi 200°C. O ensaio de DSC apresentou o pico endotérmico característico a quebra de ligações inter e intra moleculares.

- j) Com os dados obtidos pelas curvas de DMA foi possível calcular as temperaturas de transição vítrea (Tg) para os compósitos CETB10, CETB20 e CETB30 pelo método da ASTM 1640, tendo sido encontrados valores próximos a 95°C. O módulo de armazenamento cresceu de acordo com o percentual de reforço, obtendo para o CETB30 um valor 2050 MPa.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Produzir amostras com maiores teores de reforço de tecido de buriti do que os teores utilizados na presente pesquisa e definir a porcentagem máxima segura, acima da qual se observa do trauma do compósito após o impacto balístico do SBM;
- Realizar análise do comportamento dinâmico para os materiais utilizados como SBMT e SBMA com tecido de buriti e verificar a impedância de choque entre eles;
- Desenvolver protótipo de placa e colete balístico de baixo custo, baseados em compósitos reforçados com FNL;
- Realizar análise da pastilha cerâmica aplicada a blindagem contra radiações, para verificar se a alta densificação apresenta resultados favoráveis;
- Aplicar tratamentos químicos aos tecidos de buriti para verificar se há melhora da interação fibra matriz;
- Testar outros compósitos reforçados com FNLs para verificar o comportamento balístico de nível III e III-A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRATE, S. **Ballistic Impact on composite structures**. 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 215-20, 1998.
- AFSHARI, M.; CHEN, P.; KOTEK, R. **Relationship Between Tensile Properties and Ballistic Performance of Poly (ethylene naphthalate) Woven and Nonwoven Fabrics**. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 125, 2271–2280, Wiley Periodicals, Inc., 2012.
- ALBAGLI, S. **Amazônia: fronteira geopolítica da biodiversidade**. *Revista Parcerias Estratégicas*. Centro de Estudos Estratégicos do Ministério da Ciência e Tecnologia. n. 12, p.6, set 2001.
- ALMOND, E.A., EMBURY, J.D., WRIGHT, E.S. Fracture in laminated materials. Interfaces in composites. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) STP 452**, p.107-129, 1969.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 6110 – Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **E831. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis**. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **D 256. Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **D 4065. Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures**. 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **D 6110. Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **D 638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **E 1131. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry**. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS **E 1640. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis**. 2013.

- ANDERSON, C.E.; MORRIS, B.L. **The ballistic performance of confined Al₂O₃ ceramic tiles.** International Journal of Impact Engineering, vol. 12, pp. 167-187. 10, 1992.
- ANDERSON, T.L. **Fracture mechanics – Fundamentals and Applications.** 2nd. ed. New York: CRC Press, 1995.
- ASSIS, F. S. **Comportamento Balístico De Blindagem Multicamadas Com Compósitos De Poliéster Reforçados Com Fibras De Juta.** Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16661:2017 **Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção.** Rio de Janeiro. 2017.
- ABNT NBR 15000. **Blindagens Para Impactos Balísticos - Classificação E Critérios De Avaliação.** Rio De Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). 2005.
- ABNT NBR 6220. **Material refratário denso – determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida.** 2011.
- ABNT NBR ISO 5017. **Produtos refratários conformados densos – Determinação da densidade de massa, porosidade aparente e porosidade real.** 2015.
- ABNT NBR 10591. **Materiais Têxteis - Determinação da gramatura de superfícies têxteis.** 2008.
- BARBOSA, A. De P.; OLIVEIRA, M. P.; ALTOÉ, G. R.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S.N. **Charpy Impact Test of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Buriti Fibers.** Materials Science Forum, v. 775-776, p. 296-301, 2014.
- BARBOSA, Anderson de Paula. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Buriti.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011.
- BHATNAGAR, A. **Lightweight ballistic composites: military and lawenforcement applications.** Woodhead Publishing, 2006.
- BORVIK, T.; LANGSETH, M.; HOPPERSTAD, O.S.; MALO, K.A. **Ballistic penetration of steel plates.** International Journal of Impact Engineering 1999; 22: 885 – 886.
- BRAGA, F.O. **Comportamento Balístico de uma Blindagem Multicamada Utilizando Compósito Poliéster-Curauá como Camada Intermediária.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.

- BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; LIMA Jr, E.P.; MONTEIRO, S.N. **Performance of natural curauá fiber-reinforced polyester composite under 7.62 mm bullet impact as a standalone ballistic armor.** Jour. Mater. Res. Technol. 2017; 6(4): 323-328.
- BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; LUZ, F.S.; LOPES, P.H.L.M.; LIMA Jr, E.P.; MONTEIRO, S.N. **High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates.** Jour. Mater. Research and Technology 2017; 6: 417-422.
- BRAMBILLA, V. C. **Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e degradação de compósitos de poli (ácido láctico)/buriti.** Dissertação de Mestrado, 163 p. Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologia. Caxias do Sul, Brasil. 2012.
- BÜRGER, D.; DE FARIA, A.R.; DE ALMEIDA, S.F.; DE MELO, F.C.; DONADON, M.V. **Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours.** International Journal of Impact Engineering 2012: 63-77.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISH, D.G. **Materials Science and Engineering – An Introduction.** 9th edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 2018.
- CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. **Characterization of curaua fiber.** Mol Cryst Liq Cryst 2000; 353: 149-152.
- CATTANI, I. M. **Fibra de Buriti (Mauritia flexuosa Mart.): registro em comunidade local (Barreirinhas – MA, Brasil), caracterização físico-química e estudo com impregnação com resinas.** Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, em 2016. – São Paulo, 2016.
- CHAGAS, C.F.M. **Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina.** Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- CHAWLA, K. K. Livro: **Composites Materials: Science and engineering.** New York, Springer-Verlag, 1987.
- DE ARAÚJO, B.M. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- DITTENBER, D. B.; GANGARAO HOTA V.S. **Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure.** Composites: Part A Vol. 43, 1419-1429, 2012.
- DOUGLAS, T. B., DEVER, J. L. J. Am. Chem. Soc., 76 (19), p.4826, 1954.
- FARUK, O. et al. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** Progress in Polymer Science, Vol. 37, 1552– 1596, 2012.

- GARCIA FILHO, Fabio da Costa. **Avaliação do compósito de matriz epóxi reforçado com fibras de piaçava para aplicação em sistema de blindagem multicamadas.** Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- GOMES, A.V. **Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.
- JESUS, P. R. R. De. **Efeitos da adição do fluoreto de lítio na densificação da alumina aditivada com 4% em peso de nióbia.** Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia. 130p. Rio de Janeiro, 2016.
- HUI, D.; DUTTA, P.K. **A new concept of shock mitigation by impedance-graded materials.** Composites: Part B 2011; 42: 2081-2184.
- JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibers and Biocomposites.** Carbohydrate Polymers, Vol. 71, 343-364, 2008.
- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAURS, I. Livro: **Cellulose Fibers: Bio and Nano-Polymer Composites.** 1st Ed Springer, New York, EUA. 2011.
- LAVORATTI, A.; ROMANZINI, D.; AMICO, S.C. and ZATTERA A.J. **Influence of Fibre Treatment on the Characteristics of Buriti and Ramie Polyester Composites.** Polymers & Polymer Composites, Vol. 25, No. 4, 2017.
- LEÃO, A.L., TAN, I.H., CRASCHI, J.C. **Curaua fiber – A tropical natural fibers from Amazon - Potential and Application in Composites.** In: International Conference on Advanced Composites, pp. 557–564, Hurghada, Egito, 1998.
- LOURO, L.H.L.; GOMES, A. V.; COSTA, C. R. C. **Dynamic fragmentation of alumina with additions of niobia and silica under impact.** 19th International symposium of ballistics. Interlaken, Switzerland: s.n., 2001
- LOURO, L.H.L.; MEYERS, M.A. **Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics.** Journal of Materials Science, 24; 2516-2532, 1989.
- LOVEJOY, T.; INOUE, C.Y.A.; HALL, A.; BUCCINI, J.; CAMPOS, M. **O Brasil na Agenda Internacional para o Desenvolvimento Sustentável. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.** MMA (Ministério do Meio Ambiente), 2013. 190p.
- LUZ, F.S. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada do Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- LUZ, F.S.; LIMA Jr, E.P.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N. **Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric.** Materials Research 2015; 18(2): 170-177.

- MARGEM, J.I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.
- MARGEM, Jean Igor; MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M. . **Charpy impact tests epoxy matrix composites reinforced with malva fibers**. In: tmS 2014 - 143 RD ANNUAL MEETING EXHIBITION, 2014, san diego - CA - USA. characterization of Soft Materials I., 2014.
- MARTIN, A.R. Caracterização e modificação de fibras de sisal por plasma a frio visando aplicação em compósitos poliméricos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2001.
- MARTIN, A.R.; MARTINS, M.A.; MATTOSO, L.H.C.; SILVA, O.R.R.F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 19, n01, p.p. 40-46, 2009.
- MAZUNDAR, S.K. Livro: **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. CRC Press, New York, EUA. 2002.
- MEDVEDOVSKI, E. **Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure**. Part 1. *Ceramics International* 2010; 36: 2103-2115.
- MEDVEDOVSKI, E. **Lightweight ceramic composite armour system**. *Advances in Applied Ceramics* 2006; 105(5): 241-245.
- MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MILANEZI, T.L. **Avaliação do Comportamento Balístico Sinérgico de Blindagem Multicamadas com a Fibra de Rami**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Biodiversidade. Biodiversidade Brasileira**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 09 mar. 2018.
- MOHANTY, A.K.; KHAN, M.A.; HINRICHSEN, G. **Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics – polyester amide composites**. *Composites Part A*. 2000; 31: 143-150.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **Biofibres, Biodegradable Polymers and Bio-composites: An Overview**. *Macromolecular Materials and Engineering* 2000; 276/277: 1–24.
- MONTEIRO, S.N. et al. **Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly – An overview**. *JOM – A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society* 2009; 61(1): 17-22.
- MONTEIRO, S.N. **Properties and structure of Attalea funifera (piassava) fibers for composite reinforcement – a critical Discussion**. *Natural Fibers* 2008; 6(2): 191–203

- MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. **Charpy impact notch toughness of piassava fiber reinforced polyester matrix composites.** (in Portuguese). *Rev Mater* 2006; 11(3): 204–10.
- MONTEIRO, S.N.; ASSIS, F.S.; FERREIRA, C.L.; Simonassi, N.T.; Weber, R.P.; OLIVEIRA, Oliveira, M.S.; COLORADO, H.A.; Pereira, A.C. **Fique Fabric: A Promising Reinforcement for Polymer Composites.** *Polymers* 2018, 10, 246.
- MONTEIRO, S.N.; BRAGA, F.O.; LIMA Jr E.P.; LOURO, L.H.L.; DRELICH, J.W. **Promising curaua fiber-reinforced polyester composite for high-impact ballistic multilayered armor.** *Polymer Engineering & Science* 2016; 57(9): 947-954.
- MONTEIRO, S.N.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L.; SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. **Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor.** *Metallurgical and Materials Transactions A* 2015; 46(1): 37–40.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.; BAVITORI, A.B.; SILVA, I.L.A.; COSTAL, L.L. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials - An Overview.** *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, Vol. 42A, pp.2963-2974, 2011.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.; BAVITORI, A.B.; SILVA, I.L.A.; COSTAL, L.L. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview.** *Metallurgical and Materials Transactions A* 2011; 42A: 2963-2974.
- MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C.N.; FERREIRA, C.L.; LIMA, E.S.; WEBER, R.P.; SUAREZ, J.C.M.; FIGUEIREDO, A.B.S.; PINHEIRO, W.A.; SILVA, L.C.; LIMA JR., E.P. **Natural Curaua Fiber-Reinforced Composite in Multilayered Ballistic Armor.** *Metallurgical and Materials Transactions A* 2015; 46: 45674577.
- MONTEIRO, S.N.; MILANEZI, T.L.; LOURO, L.H.L.; LIMA Jr, E.P.; BRAGA, F.O.; GOMES, A.V.; DRELICH, J.W. **Novel Ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor.** *Materials and Desing* 2016; 96: 263-269.
- MONTEIRO, S.N.; SATYANARAYANA, K.G.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O.; LOPES, F.P.D.; SILVA, I.L.A.; BEVITORI, A.B.; INÁCIO, W.P.; BRAVO NETO, J.; PORTELA, T.G. **Selection of high strength natural fibers.** *Revista Matéria* 2011b; 15(4): 488-505.
- MONTEIRO, S.N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R.J.S.; MARGEM, F.M. **Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites - An overview.** *Materials Science & Engineering A*. Vol. 557, pp. 17-28, 2012a.
- MONTEIRO, S.N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R.J.S.; MARGEM, F.M. **Thermogravimetric Stability of Polymer Composites Reinforced with Less Common Lignocellulosic Fibers – An Overview.** *Journal of Materials Research and Technology*; 1(2): pp.117-126, 2012b.

- MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. **Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact**. Composites Science and Technology 2000; 60: 2631-2642.
- MUKHERJEA, R.N.; PAL, S.K; SANYAL, S.K. **Studies on jute fiber composites with polyesteramide polyols as interfacial agent**. Journal of Applied Polymer Science. v. 28, pp. 3029-3040, 1983.
- Nabi E SAHED
- NASCIMENTO, L.F.C. **Caracterização do compósito de epóxi/fibra de malva para emprego em blindagem balística multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de PósGraduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2017.
- NASCIMENTO, L.F.C.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N; JUNIOR, É.P.L.; LUZ, F.S. da. **Natural Mallow Fiber-Reinforced Epoxy Composite for Ballistic Armor Against Class III-A Ammunition**. JOM (2017).
- NASCIMENTO, L.F.C.; LOURO, L.H.L; MONTEIRO, S.N; GOMES, A.V.; JUNIOR, É.P.L.; MARÇAL, R.L.S.B. **Ballistic Performance in Multilayer Armor with Epoxy Composite Reinforced with Malva Fibers**. In: Meyers M. et al. (eds) Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress. The Minerals, Metals & Materials Series. pp. 647 - 655. 2017.
- NEVES, Anna Carolina Cerqueira; ROHEN, Lázaro Araújo; VIEIRA, Janaina da Silva; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes; MARGEM, Frederico Muylaert; MONTEIRO, Sergio Neves Monteiro; MANTOVANI, Dhyemila de Paula. ISSN 1516-392X. **Análise do impacto charpy em compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de cânhamo**. 71º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- N.I.J. STANDARDS 0101.04. **Ballistic Resistance of Body Armor**. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice, 2000.
- PEREIRA, Artur Camposo. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras e tecido de fique**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, 67p, 2016.
- PEREIRA, Artur Camposo; MONTEIRO, Sergio Neves ; ASSIS, Foluke Salgado De; MARGEM, Frederico Muylaert; LUZ, Fernanda Santos Da; BRAGA, Fábio De Oliveira. **Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers**. Journal of Materials Research and Technology-JMR&T, p. 312-316, 2017a.
- PEREIRA, AC; Monteiro SN; Assis FS; Colorado HA. **Izod Impact Tests in Polyester Matrix Composites Reinforced with Fique Fabric**. The Minerals, Metals & Materials Society 2017b.
- QIN, L.; QIU, J.; LIU, M.; DING, S.; SHAO, L.; LÜ, S.; ZHANG, G.; ZHAO, Y.; FU, X. **Mechanical and thermal properties of poly(lactic acid) composites with rice straw fiber modified by poly(butyl acrylate)**. Chemical Engineering Journal, 2010. Vol. 166, Issue 2, 772-778, 2011.

- REED, J.S. **Principles of ceramic processing**. s.l. : John Wiley and Sons, 1995.
- Reportagem Jornal Nacional, **Rio tem 30 PMs mortos em 3 meses; cabo morre baleado na Pavuna. G1 2018**. [acesso em 7 jun. 2018] 22:45. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/03/rio-tem-30-pms-mortos-em-3-meses-cabo-morre-baleado-na-pavuna.html>.
- RIEDEL, R., IONESCU, E., e CHEN, W. **Modern trends in advance ceramics**. Ceramics science and technology. Vol. 1, 2008.
- RIOS, M.N.S; PASTORE JR.F. (Org). **Plantas da Amazônia: 450 espécies de uso em geral**. Universidade de Brasília (UnB), EBook. Brasília, 2011. 1691p.
- SANTOS JL, MARÇAL RLSB, JESUS PRR, GOMES AV, LIMA Jr. EP, MONTEIRO SN, DE CAMPOS JB, LOURO LHL. **Effect of LiF as Sintering Agent on the Densification and Phase Formation in Al₂O₃-4 Wt Pct Nb₂O₅ Ceramic Compound**. Metall Mater Trans. A, v. 48, p. 4432–4440, 2017.
- SANTOS, M.A.; AMORIM Jr, W.F.; BASTIAN, F.L.; SUAREZ, J.C.M.; CARDOSO, A.L.V.; CHAVES, G.Q. **Comportamento sob Impacto Balístico de um Sistema Compósito para Blindagem**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos 2006.
- SANTOS, N.S.S. **Análise experimental e teórica do comportamento mecânico sob carregamentos quase-estáticos de compósitos reforçados com fibras vegetais**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP. 2010.
- SANTOS, N.S.S.; DIAS, C.G. B.T.; SANCHES, ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. **Caracterização microestrutural e mecânica da fibra de miriti para utilização como reforço em compósitos poliméricos**. In: 18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais, Porto de Galinhas, 2008. Anais do 18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais, 2008.
- SANTOS, S.S.; SOUZA, A. A. de; PAOLI, M.A. de, SOUZA; C.M.L. de. **Cardanol–formaldehyde thermoset composites reinforced with buriti fibers: Preparation and characterization**. Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 41, n. 9, p. 1123-1129, 2010.
- SANTOS, J. L. **Comportamento Balístico De Componente Cerâmico À Base De Al₂O₃-Nb₂O₅-LiF Em Blindagem Multicamada**. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016.
- SANTOS, J. L., MARÇAL, R. L., JESUS, P. R., GOMES, A. V., LIMA, E. P., ROCHA, D. N., LOURO, L. **Mechanical properties and ballistic behavior of LiF-added Al₂O₃-4wt%Nb₂O₅ ceramics**. Journal of Materials Research and Technology. 2018.
- SARAIVA, N, A. (2009). **Manejo Sustentável e Potencial Econômico da Extração do Buriti nos Lençóis Maranhenses**. Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento sustentável. Brasília, DF, UNB, Universidade de Brasília.

- SATYANANRAYANA, K.G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P.S.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S.G. **Natural Fibre-Polymer Composites**. Cement & Concrete Composites, Vol. 12, 117–136, 1990.
- SATYANARAYANA, K. G and MUKHERJEE, P.S. **Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1, Sisal Fibre**. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 19 (1984) 3925-3934.
- SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P.S.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S.G.K. **Natural Fibre: Polymer Composites**. Cement and Concrete Composites. 12, 117-136, 1999.
- SATYANARAYANA, K.G.; ARIZAGA, G.C.; WYPYCH, F. **Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview**. Progress in Polymer Science, Vol. 34, 982-1021, 2009.
- SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications**. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- SHOKRIEH, M.M.; JAVADPOUR, G.H. **Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor**. Composite Structures. v.82, pp.269-276, 2008.
- SILVA, I.L.A. da; BEVITORI, A.B.; ROHEN, L.A.; MARGEM, F. M.; BRAGA, F. O. and MONTEIRO, S.N. **Characterization by Fourier Transform Infrared (FTIR) Analysis for Natural Jute Fiber**. 2016. Materials Science Forum, Vol. 869, pp 283-287.
- SILVA, L.C. **Comportamento balístico do compósito epóxi-curauá em blindagem multicamada**. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- TASDEMIRCI, A.; TUNUSOGLU, G.; GUDEN, M. **The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study**. International Journal of Impact Engineering 2012; 44: 1-9.
- TRINDADE, W. **Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- TRINDADE, W.; GOMES. A. V.; LOURO, L.H.L. **Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica de Alumina**. Revista Militar de Ciência & Tecnologia 2013; 4: 71-79.
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. **Recent trends in Ballistic Protection**. Textiles and Light Industrial Science and Technology 2014; 3: 37-47.
- WESTIN J., **Ballistic Impact Properties of Fiber – Reinforced Composite structures**, Tese de Mestrado em segurança e defesa, Swedish Defense Research Agency, 2011.

WINTER, C.; GRANDI, G.L.; DARSIE, F.R.F.; SCHULTZ, M.E.R.; GUTERRES, M.
**Propriedades Mecânicas de Resinas Poliméricas utilizadas no acabamento de
cursos.** 8p. COBEQ 2014 -XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química.
Florianópolis, 2014.